

# Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe

Metodologías y herramientas para la evaluación de impactos de la inundación y la erosión por efecto del cambio climático



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA



IHcantabria  
INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL  
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



# Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL



Si desea recibir información oportuna sobre nuestros productos editoriales y actividades, le invitamos a registrarse. Podrá definir sus áreas de interés y acceder a nuestros productos en otros formatos.



NACIONES UNIDAS



[www.cepal.org/es/suscripciones](http://www.cepal.org/es/suscripciones)

Este documento fue preparado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria), bajo la dirección de Íñigo J. Losada Rodríguez. Los trabajos del proyecto fueron realizados por los investigadores Adrián Acevedo, Paula Camus, Pedro Díaz-Simal, Antonio Espejo, Melisa Menéndez, Pelayo Menéndez, Marta Ramírez, Alexandra Toimil, Saúl Torres, María Emilia Maza y María Fuentes, todos ellos del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria.

El estudio se llevó a cabo dentro de las actividades de colaboración entre la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y el Gobierno de Cuba “Evaluación de impactos y vulnerabilidad en la zona costera norte occidental de Cuba ante huracanes y el cambio climático”, en el marco del proyecto de la CEPAL y el Gobierno de España “Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe”. Por parte de la CEPAL, el equipo que coordinó y supervisó el estudio estuvo integrado por Carlos de Miguel, Jefe de la Unidad de Políticas Públicas para el Desarrollo Sostenible; José Javier Gómez, Oficial de Asuntos Ambientales, y Karina Martínez y Mauricio Pereira, Investigadores, todos ellos de la División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos.

Se agradece especialmente el apoyo del personal de la Oficina Española de Cambio Climático del Ministerio para la Transición Ecológica de España, en particular de Ana Pintó y Eduardo González, así como el de Victoria Osuna Recio, Responsable de Proyectos de Desarrollo Rural de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) en Cuba.

Además, para la ejecución de este proyecto se contó con la colaboración de un equipo de funcionarios de la Agencia de Medio Ambiente del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba, integrado por Maritza García, Presidenta; Jesús Guerra Bell, Especialista Principal de la Dirección de Relaciones Internacionales; Rudy Montero Mata, Jefe del Grupo de Evaluación de Riesgos; Sergio Lorenzo Sánchez, Coordinador Científico del Macroproyecto; Isabel Torna Falco, Especialista del Grupo de Evaluación de Riesgos, y Jorge Olivera Acosta y Ramón Pérez Díaz, Especialistas del Macroproyecto.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de la Organización.

Los límites y los nombres que figuran en los mapas de esta publicación no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

Publicación de las Naciones Unidas  
LC/TS.2018/70  
Distribución: L  
Copyright © Naciones Unidas, 2018  
Todos los derechos reservados  
Impreso en Naciones Unidas, Santiago  
S.18-00601

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Publicaciones y Servicios Web, publicaciones.cepal@un.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.

## Índice

Prefacio .....	7
Introducción .....	9
A. Acerca de este documento .....	9
B. Antecedentes .....	10
C. Estado actual del conocimiento .....	10
1. En relación con los componentes del riesgo .....	11
2. En relación con la caracterización de impactos .....	11
3. En relación con la evaluación de riesgos y consecuencias .....	12
I. Marco integrado para el análisis de los riesgos del cambio climático en la costa .....	13
A. Los sistemas costeros, impactos y sectores estratégicos .....	14
B. Los componentes del riesgo .....	16
1. Peligrosidad .....	16
2. Exposición .....	18
3. Vulnerabilidad .....	18
C. La estrategia para modelar impactos .....	18
D. La evaluación del riesgo y las consecuencias .....	19
E. La implementación del marco .....	21
1. Implementación del marco para el estudio de la inundación costera .....	21
2. Implementación del marco para el estudio de la erosión costera .....	21
II. Análisis de la inundación costera .....	25
A. Modelado del impacto .....	25
B. Evaluación de las consecuencias del riesgo .....	28
C. Propuesta metodológica para un análisis multisectorial de las consecuencias del riesgo de inundación costera a escala regional y con alta resolución .....	28
1. Peligrosidad .....	29
2. Exposición .....	31
3. Vulnerabilidad .....	31
4. Modelado del impacto .....	32
5. Estimación de las consecuencias del riesgo .....	33
6. Agregación de las consecuencias del riesgo .....	35



III. Análisis de la erosión costera.....	37
A. Modelado del impacto .....	37
B. Evaluación del riesgo .....	39
C. Propuesta metodológica para un análisis sectorial del riesgo de erosión costera a escala regional y con alta resolución .....	40
1. Peligrosidad .....	41
2. Modelado probabilístico del impacto.....	42
3. Exposición y vulnerabilidad.....	47
4. Estimación del riesgo .....	48
Bibliografía.....	51

## Cuadros

Cuadro 1	Fortalezas y debilidades de los métodos de regionalización ( <i>downscaling</i> ) estadístico y dinámico.....	17
Cuadro 2	Escalas espaciales para el análisis de riesgos.....	20
Cuadro 3	Resumen de los principales elementos de la metodología desarrollada y su comparación con la literatura existente.....	29
Cuadro 4	Principales elementos de la metodología desarrollada y su comparación con la literatura existente .....	41

## Gráficos

Gráfico 1	Escala espacial del estudio de inundación .....	26
Gráfico 2	Estrategias numéricas para el estudio de la inundación a escala regional/local .....	27
Gráfico 3	Ejemplo de estadísticos de oleaje y marea meteorológica proyectados en la costa del Principado de Asturias (norte de España) entre 1979-2010 y 2071-2099.....	30
Gráfico 4	Ejemplo de Modelo Digital de Terreno (MDT) de la costa del Principado de Asturias mejorado con defensas costeras .....	31
Gráfico 5	Ejemplo de curvas de daño adaptadas de HAZUS para las viviendas de la costa del Principado de Asturias en las que se ha considerado cimentación con zapata, muro de carga y cubierta con cerchas .....	32
Gráfico 6	Inundación asociada al evento de 100 años de período de retorno, para el clima actual y para distintos aumentos del nivel medio del mar, en la ría de Navia (Principado de Asturias).....	33
Gráfico 7	Distribución espacial de los daños estructurales debidos al impacto de inundación sobre los activos industriales de la costa del Principado de Asturias (sin descontar) .....	34
Gráfico 8	Ejemplo de distribución espacial de los daños estructurales debidos al impacto de inundación sobre los activos residenciales de la costa del Principado de Asturias (descontados y sin descontar) .....	34
Gráfico 9	Ejemplo de valor en riesgo sectorial agregado para la combinación del evento de 100 años de período de retorno y el aumento del nivel medio del mar (ANMM) correspondiente al escenario de trayectoria de concentración representativa (RCP) 8.5 en la costa del Principado de Asturias .....	35
Gráfico 10	Ejemplo de persistencia de la altura de ola significativa (Hs) sobre los umbrales correspondientes a los percentiles 50, 70, 90, 95 y 99 de la distribución .....	42

Gráfico 11	Ejemplo de distribución espacial del percentil del 75%, la mediana y el percentil del 25% de todo el rango de R2100 para cada playa del Principado de Asturias y según la trayectoria de concentración representativa (RCP) 8.5 .....	45
Gráfico 12	Ejemplo de función de distribución de la probabilidad de erosión en la playa de San Lorenzo (Principado de Asturias) para la trayectoria de concentración representativa (RCP) 8.5 .....	46
Gráfico 13	Distribución espacial del percentil del 75%, la mediana y el percentil del 25% del evento de erosión de 50 años de período de retorno, e índice de erosión asociado para cada playa del Principado de Asturias a fin del siglo XXI, según la trayectoria de concentración representativa (RCP) 8.5 .....	47
Gráfico 14	Distribución espacial de la pérdida acumulada o total de valor recreativo correspondiente al percentil del 75%, la mediana y el percentil del 25% de todo el rango de R2100 para cada playa del Principado de Asturias y según la trayectoria de concentración representativa (RCP) 8.5 .....	48
Gráfico 15	Pérdida de valor recreativo en las playas de Navia, Otur, Luarca, Salinas, San Lorenzo y Rodiles (Principado de Asturias) correspondiente al percentil del 75%, la mediana y el percentil del 25% de retroceso de 5, 10, 25 y 50 años de período de retorno, a fin del siglo XXI y según la trayectoria de concentración representativa (RCP) 8.5 .....	49
Gráfico 16	Daño total o acumulado esperado sobre el valor recreativo de las playas del Principado de Asturias, según la trayectoria de concentración representativa (RCP) 8.5, entre 2010 y 2100 .....	50
 Diagramas		
Diagrama 1	Marco de análisis de riesgos .....	14
Diagrama 2	El riesgo sobre los sistemas costeros .....	15
Diagrama 3	Ejemplo de sectores estratégicos para los sistemas costeros .....	15
Diagrama 4	Cascada de incertidumbre en la caracterización de impactos del cambio climático .....	17
Diagrama 5	Cascada de incertidumbres en la cuantificación del riesgo derivado del cambio climático .....	20
Diagrama 6	Marco de riesgo para el estudio de la inundación costera .....	22
Diagrama 7	Marco de riesgo para el estudio de la erosión costera .....	23





## Prefacio

Desde 2008 la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), el Gobierno de España y la Universidad de Cantabria han venido colaborando en una línea de investigación denominada “Estudio regional de los efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe”, cuyo objetivo fundamental ha sido el establecimiento de un marco de cooperación, para proporcionar la mejor información científico-técnica disponible en la región que permita afrontar la lucha contra el cambio climático en las zonas costeras de América Latina y el Caribe y para apoyar a la Red Iberoamericana de Oficinas de Cambio Climático (RIOCC).

Durante la primera fase de esta colaboración se desarrolló una metodología específica para la evaluación de impactos del cambio climático en las áreas costeras. Los resultados de esta fase se publicaron en seis documentos sobre el análisis de las dinámicas y las tendencias, la vulnerabilidad de las costas, los impactos derivados, los riesgos asociados, así como los efectos teóricos del cambio climático y la descripción metodológica. Además, se elaboró un visor web que permite georreferenciar las dinámicas y los impactos con una resolución espacial de cinco kilómetros en toda la franja costera de la región. Las metodologías y resultados obtenidos de esta línea de investigación sirven de base para la realización de nuevos estudios sectoriales y subnacionales que permiten hacer análisis de alta resolución sobre impactos y adaptación en las zonas costeras de América Latina y el Caribe.

El Caribe es una zona de gran vulnerabilidad ante los efectos derivados del cambio climático, por lo que esta realidad llevó a los Gobiernos de Cuba y España, la CEPAL y la Universidad de Cantabria a emprender un trabajo de colaboración para profundizar los resultados obtenidos en la primera etapa, en esta oportunidad en el marco del proyecto “Evaluación de impactos y vulnerabilidad en la zona costera norte occidental de Cuba ante huracanes y el cambio climático”.

La costa de Cuba es de extraordinaria importancia para el país, ya que, como se indica en su Segunda Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, debido a la presencia de núcleos poblacionales de gran densidad y con tasas de crecimiento muy altas, y la intensa actividad turística, industrial y marítimo-portuaria, se registra gran competencia entre la gestión económica y el funcionamiento de los ecosistemas. Por lo tanto, existe un inminente riesgo ante cualquier afectación a la costa del archipiélago cubano como consecuencia del ascenso del nivel medio del mar y de las inundaciones provocadas por eventos hidrometeorológicos extremos.



El proyecto de evaluación de impactos permitió la realización de un programa de transferencia tecnológica y de capacitación al personal técnico de la Agencia de Medio Ambiente de Cuba en los campos de la evaluación económica de proyectos ambientales y en el análisis económico aplicado al medio ambiente, así como la generación de datos para la caracterización del oleaje de la costa de Cuba. La capacitación se implementó mediante un conjunto de cursos impartidos por el personal del Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IHC) y la CEPAL en La Habana y en Cantabria. Estas actividades se desarrollaron durante 2017 y el primer semestre de 2018. Los principales resultados de este proyecto comprenden los documentos: “Reconstrucción histórica y proyecciones del efecto del cambio climático sobre el oleaje en la costa de Cuba”, “Evaluación de los sistemas de protección de los corales y manglares de Cuba” y “Metodologías y herramientas para la evaluación de impactos de la inundación y la erosión por efecto del cambio climático”.

# Introducción

## A. Acerca de este documento

En la costa coexisten interacciones complejas entre el sistema natural y socioeconómico que sugieren que las consecuencias del cambio climático pueden manifestarse de muchas formas. Los análisis de riesgos permiten identificar las áreas más expuestas a diferentes impactos, entender su origen, identificar su extensión y gravedad, así como asistir en la elaboración de planes de gestión y en la toma de decisiones tales como estrategias de adaptación.

Este documento recoge una revisión del estado del conocimiento actual acerca de las metodologías y herramientas más utilizadas para la evaluación de los riesgos y las consecuencias del cambio climático sobre los sistemas natural y socioeconómico, en particular de los asociados a los impactos de inundación y erosión de la costa. Con este objetivo, el documento se ha estructurado en tres bloques: un primer bloque introductorio en el que se presentan los antecedentes y una revisión general de la literatura en relación con el análisis de los riesgos de inundación y erosión sobre los sistemas costeros; un segundo bloque orientado a revisar las estrategias existentes para abordar la caracterización de la inundación costera y sus consecuencias a diferentes escalas, y un tercer bloque centrado en los diferentes métodos que se encuentran en la literatura para analizar los cambios en la línea de costa y sus riesgos derivados. Tanto en el segundo como en el tercer bloque, se propone en cada caso una metodología integrada para la evaluación a escala regional de los riesgos de inundación y erosión de la costa, respectivamente.

Parte de los contenidos del documento corresponden a investigaciones realizadas por IHCantabria en el marco del trabajo titulado *Costes de la inacción debidos al efecto del cambio climático en la costa del Principado de Asturias* (Losada, Toimil y Díaz-Simal, 2016), la tesis doctoral titulada *Un marco para la evaluación multisectorial de los riesgos del cambio climático en zonas costeras* (Toimil, 2018) y diversas publicaciones en revistas científicas (Toimil, Losada y Camus, 2016; Toimil y otros, 2017a; Toimil y otros, 2017b, y Toimil y otros, 2018).



## B. Antecedentes

El incremento de la inundación y la erosión por efecto del cambio climático, principalmente como consecuencia del aumento del nivel medio del mar (ANMM), se encuentra entre las mayores amenazas a las que se ven sometidos los sistemas costeros y zonas bajas de todo el mundo (Wong y otros, 2014). Esta subida del nivel del mar conllevará, además, una reducción significativa de la excepcionalidad de los eventos extremos, haciéndolos mucho más frecuentes de lo que son hoy día. Si bien algunos sistemas son capaces de retroceder tierra adentro para acomodarse a los cambios en el nivel del mar, otros experimentarán el clásico caso de estrés costero, que ocurre cuando una costa en erosión se acerca a estructuras rígidas e inmóviles, como malecones o acantilados, dando lugar a impactos adversos para el medio ambiente y la sociedad (Jackson y McIlvenny, 2011). En consecuencia, se espera que los daños se intensifiquen a lo largo del siglo, a medida que el ANMM, el desarrollo socioeconómico y la redefinición de la política territorial aumenten la población, los bienes y los flujos de actividad en la franja costera (Nicholls y otros, 2008).

Desde esta perspectiva, una amplia gama de marcos metodológicos está emergiendo para la evaluación socioeconómica de los riesgos y consecuencias de la inundación y de la erosión a diferentes escalas. La metodología clásica aplicada al análisis de riesgos meteorológicos extremos ha derivado en un marco conceptual generalizado (IPCC, 2014), basado en la combinación de la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad.

Recientemente se han desarrollado iniciativas relevantes para la identificación de las amenazas causantes de la inundación y el retroceso de la línea de costa (Rueda y otros, 2017). La exposición y la vulnerabilidad, elementos clave del riesgo, son dinámicas, varían en el tiempo y el espacio, y dependen de factores económicos, sociales, geográficos, demográficos, culturales, institucionales y ambientales (IPCC, 2012; Gallina y otros, 2016). No existe un método único para evaluar cada componente del riesgo, y las aproximaciones existentes son sumamente dependientes de la disponibilidad de datos, de la escala espacial, de la estrategia de modelado del impacto considerado y del tipo de análisis estadístico requerido, entre otros. Además, la gestión y la ordenación del territorio tienen lugar a escala regional, lo que se traduce en la necesidad de la integración de los riesgos y las consecuencias en un área determinada. A este respecto, el desafío se encuentra principalmente en el tratamiento de un conjunto de sectores socioeconómicos de forma integrada, sobre todo si estos sectores tienen una naturaleza diferente.

Las mayores incertidumbres vinculadas al análisis del riesgo están asociadas a los escenarios de largo plazo, en particular cuando la escala espacial del análisis es muy detallada. Otras fuentes de incertidumbre provienen de las aproximaciones, métodos y herramientas empleadas que contribuyen a la propagación y al incremento de la incertidumbre inherente de los datos a través del proceso de evaluación de riesgos. Por lo tanto, existe una creciente urgencia de enmendar los marcos actuales para la toma de decisiones de modo que estos puedan tener en cuenta tal incertidumbre (Hallegatte, 2009). A este respecto, las metodologías probabilísticas que implican múltiples simulaciones del modelo de impacto con diferentes combinaciones de los forzamientos cumplen un papel fundamental (Ranasinghe, 2016).

## C. Estado actual del conocimiento

En un contexto de profunda incertidumbre, los marcos de análisis probabilísticos están emergiendo con fuerza como los paradigmas más apropiados para idealmente evaluar los impactos y riesgos del cambio climático e identificar opciones de adaptación. No obstante, según el propósito del análisis, la escala geográfica y los datos disponibles, otras formas de evaluación pueden constituir también alternativas válidas. Esta investigación aborda temas relacionados con la forma en la que se resuelven habitualmente la peligrosidad y la exposición, los diferentes modos en los que se aborda la vulnerabilidad, la gran variedad de modelos de impacto existentes y cómo estos pueden encajar en marcos probabilísticos, y los retos a los que nos enfrentamos cuando valoramos el riesgo y las consecuencias.

## 1. En relación con los componentes del riesgo

De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014), el riesgo resulta de la combinación de la peligrosidad, caracterizada por las dinámicas costeras, la exposición, relativa al medio físico y socioeconómico, y la vulnerabilidad, relacionada con la susceptibilidad del sistema de ser dañado y su capacidad adaptativa.

La peligrosidad asociada a la inundación costera y a la erosión depende esencialmente del oleaje, la marea meteorológica, la marea astronómica y el ANMM. Sin embargo, aunque existe mucha investigación centrada en el análisis del riesgo de inundación debido al nivel del mar (Rosenzweig y otros, 2011; Hallegatte y otros, 2013), pocos autores tienen en cuenta el efecto del oleaje (Dawson y otros, 2009), aunque este ha sido responsable de daños importantes en la costa. Además de las dinámicas marinas, la precipitación y el caudal fluvial pueden contribuir a la inundación costera (Muis y otros, 2015) y los estuarios pueden alterar los patrones de erosión/acreción de las playas adyacentes (Ranasinghe y otros, 2013). Si bien el uso de bases de datos históricos de alta resolución (Camus y otros, 2013; Pérez y otros, 2017) es fundamental para evaluar la variabilidad interanual, así como para analizar los cambios en el régimen extremal o modelar eventos pasados (Muis y otros, 2016), se han realizado numerosos estudios sobre la base de tormentas de diseño (Ranasinghe y otros, 2012) o empleando directamente los extremos del nivel del mar proporcionados por la herramienta DIVA (Hinkel y otros, 2014). Con respecto a cómo se suele incorporar el cambio climático, mientras añadir el ANMM a la distribución actual de extremos es una práctica común (Muis y otros, 2015), pocos trabajos incluyen proyecciones de oleaje y marea meteorológica o las consideran en el análisis. Si bien es cierto que las proyecciones de oleaje y marea meteorológica para el siglo XXI arrojan cambios muy pequeños (Hemer y otros, 2013; Camus y otros, 2017), es necesario explorar la amplificación de estas dinámicas en la costa por efecto del ANMM, siguiendo una aproximación similar a la descrita en Arns y otros (2017).

Los datos de exposición locales (por ejemplo, número de personas, edificios, infraestructuras y otros elementos que podrían verse afectados ante un cierto escenario) son esenciales para la toma de decisiones en la adaptación al cambio climático. No obstante, obtener información tan detallada es aún todo un reto. Por ello, muchos estudios caracterizan la exposición a través de los usos del suelo (Prime y otros, 2015) en lugar de mediante indicadores socioeconómicos. Es más, pocos trabajos tienen en cuenta aspectos que vayan más allá de propiedades residenciales y no residenciales, y agricultura (Dawson y otros, 2009; Hall, Sayers y Dawson, 2005; Gouldby y otros, 2008). Otro tema crítico es el relativo a trabajar con datos a distintas escalas. Dado que asumir una distribución homogénea de la información en el espacio no siempre se corresponde con la realidad (Merz y otros, 2010), existen técnicas de desagregación que ayudan a obtener representaciones más realistas (Thieken y otros, 2006).

El concepto de vulnerabilidad difiere en función de la metodología (Gallina y otros, 2016). Algunos la relacionan con resiliencia, adaptabilidad y fragilidad (Liverman, 1990) y otros con la susceptibilidad de sufrir daños asociados a los cambios climáticos y socioeconómicos (Adger, 2006). Existe una gran variedad de curvas de vulnerabilidad. Estas pueden agruparse en empíricas, sintéticas y mixtas (Merz y otros, 2010), pueden ser absolutas (FEMA, 2013) o relativas (Penning-Rowsell y otros, 2005) y distinguen entre consecuencias directas e indirectas y también entre continente y contenido de los activos (FEMA, 2013). Este tipo de curvas se emplean habitualmente para evaluar los daños por inundación y suelen depender de la cota que alcanza el agua.

## 2. En relación con la caracterización de impactos

Otro aspecto fundamental en la evaluación de riesgos es la selección del modelo de impacto más apropiado. Mientras que los modelos de procesos más sofisticados pueden parecer la mejor opción para llevar a cabo un estudio de detalle, según el tipo de análisis estadístico requerido y la escala geográfica, entre otros criterios, la aproximación seguida puede considerar el uso de métodos más simples y eficientes y formulaciones de equilibrio, cuando proceda. Porque el problema no es una mera cuestión de coste



computacional, sino que a veces es el conocimiento incompleto que tenemos de los procesos y la cantidad de parámetros de calibración de los modelos los factores que limitan la idoneidad de determinadas estrategias numéricas.

En los últimos años se han desarrollado muchas metodologías para analizar la erosión costera con distintos niveles de complejidad. Estas varían desde aproximaciones basadas en indicadores, como el simple BTM (*bathub method*) (Reguero y otros, 2015; Muis y otros, 2016), que resuelve de forma grosera la propagación de la inundación en tierra cortando el Modelo Digital de Terreno (MDT) a una determinada cota, hasta análisis mucho más sofisticados, que incorporan modelado 2D o 3D, computacionalmente más demandantes y que no son aplicables a escalas más allá de la local ni para obtener estimaciones probabilísticas. Si bien el estudio de la erosión costera dista de estar tan bien cubierto como el de la inundación, se ha prestado mucha atención al análisis de la respuesta de la línea de costa a la amenaza que supone el ANMM. A ese respecto, la Regla de Bruun (Bruun, 1962) ha sido el predictor más utilizado durante décadas, tanto en su forma original como combinándola con otras fuentes/sumideros existentes en el balance sedimentario (Ranasinghe y otros, 2013; Dean y Houston, 2016). Sin embargo, estudios empíricos han demostrado que los cambios más significativos en la línea de costa ocurren debido a incrementos del nivel del mar local en combinación con grandes olas (Miller y Dean, 2004). Estas dinámicas pueden alimentar un sinnúmero de aproximaciones basadas en el perfil transversal para predecir el impacto de una tormenta sobre una duna (Larson, Erikson y Hanson, 2004), obtener la evolución de la línea de costa en el tiempo debido al oleaje (Splinter y otros, 2014) o debido a la acción combinada del oleaje y el nivel del mar (Miller y Dean, 2004) e incluso resolver procesos más complejos e interacciones no lineales (Luijendijk y otros, 2017), aunque con un coste computacional mayor.

### 3. En relación con la evaluación de riesgos y consecuencias

Los análisis del riesgo y sus consecuencias permiten identificar aquellas áreas más expuestas y vulnerables a los diferentes impactos, entender el origen de esos impactos y caracterizar su extensión y gravedad, y dar asistencia en la elaboración de planes de gestión y toma de decisiones. La literatura actual en este campo es muy diversa y varía desde evaluaciones preliminares que ayudan a detectar puntos críticos hasta análisis sectoriales de alta resolución, o incluso estimaciones probabilísticas del riesgo de inundación que también tienen en cuenta la erosión de la costa (Stripling y otros, 2017).

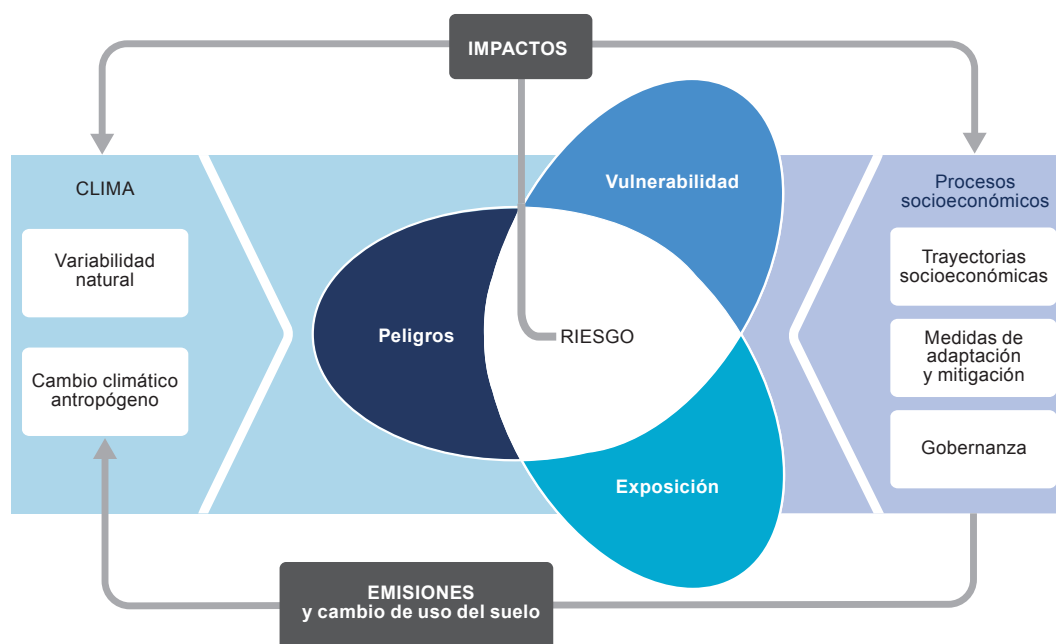
La información espacial de exposición para un escenario dado combinada con sus atributos de vulnerabilidad da lugar a la evaluación de los riesgos y las consecuencias. A este respecto, si bien los riesgos de inundación han sido ampliamente estudiados durante los últimos años (Muis y otros, 2015; Stripling y otros, 2017; Lin y otros, 2010), los riesgos derivados de la erosión apenas se han explorado. En cualquier caso, deben considerarse aspectos relacionados con la valoración de activos y flujos (por ejemplo, efectos de mercado y no mercado, e impactos indirectos) (Merz y otros, 2010) y con su variación espacio-temporal (por ejemplo, efectos distributivos y la aplicación de una tasa de descuento a los daños futuros).

Las limitaciones de las proyecciones climáticas y socioeconómicas futuras obligan a tomar decisiones en un contexto de incertidumbre. El ANMM, los cambios en la probabilidad de ocurrencia de los eventos extremos, las tendencias socioeconómicas difíciles de predecir y el gran número de parámetros que participan en el modelado del impacto son algunos ejemplos. Por ello es cada vez más imperativo pasar de enfoques deterministas a marcos probabilísticos que permitan cuantificar adecuadamente la cascada de incertidumbre que se va acumulando en todas las etapas del proceso de análisis de riesgos (Ranasinghe, 2016).

## I. Marco integrado para el análisis de los riesgos del cambio climático en la costa

El marco de referencia desarrollado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014) establece que el riesgo de los impactos relacionados con el clima se deriva de la interacción de la peligrosidad climática con la vulnerabilidad y la exposición de los sistemas humanos y naturales (véase el diagrama 1). Así pues, los cambios en el sistema climático y los procesos socioeconómicos, incluidas la adaptación y la mitigación, son impulsores de la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad. Tomando esto como punto de partida, el marco conceptual del IPCC se ha trasladado a la evaluación de los riesgos del cambio climático en zonas costeras, cuya particularidad radica en su naturaleza integrada, es decir, en que es multiamenaza, multiimpacto y multisectorial. De este modo, es posible tener en cuenta la interacción entre múltiples amenazas (por ejemplo, la acción conjunta de la cota de inundación y el caudal fluvial sobre la inundación costera), la caracterización de diferentes impactos más allá de la inundación y de la erosión de la costa, tanto de forma aislada como conjuntamente, y la consideración de un conjunto de sectores estratégicos en términos de exposición, vulnerabilidad y evaluación de riesgos y consecuencias. Aunque la atención se ha centrado en la inundación y la erosión de la costa, el procedimiento bien podría ser extendido para el análisis de otros riesgos del cambio climático, como los debidos a la intrusión salina, la acidificación, la sequía o las olas de calor. De forma general, la metodología desarrollada consiste en un proceso multinivel a través del cual los tres componentes del riesgo se desarrollan de forma individual y finalmente se integran para obtener el riesgo y sus consecuencias, ya sea en términos monetarios o de forma agregada a través de algún indicador. A este respecto, y para ofrecer una visión holística de los riesgos a los que las áreas costeras están expuestas debido al cambio y a la variabilidad climática, se ha considerado un amplio abanico de sectores estratégicos. A lo largo de las siguientes subsecciones, se proporcionan detalles acerca de la identificación de impactos, la caracterización de la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad, la estimación y la integración del riesgo y la implementación del marco.

**Diagrama 1**  
**Marco de análisis de riesgos**



Fuente: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), “Summary for policymakers”, Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2014.

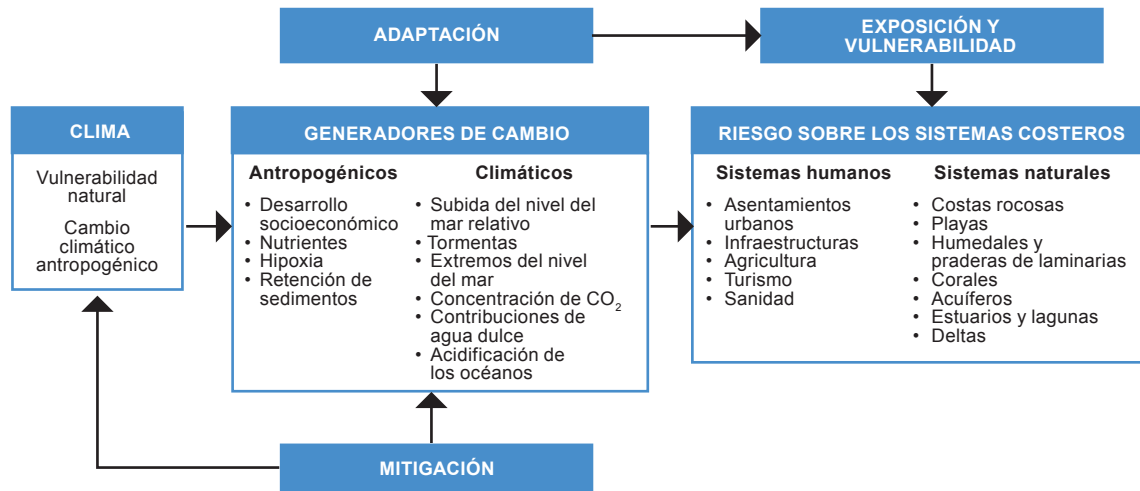
## A. Los sistemas costeros, impactos y sectores estratégicos

De acuerdo con Wong y otros (2014), los sistemas costeros se conceptualizan como naturales y humanos (véase el diagrama 2). Mientras que los naturales se refieren a ecosistemas costeros como costas rocosas, playas, humedales y praderas marinas, arrecifes de coral, acuíferos, estuarios y lagunas y deltas, los sistemas humanos incluyen el medio construido (por ejemplo, asentamientos e infraestructura), las actividades humanas (por ejemplo, el turismo y la producción de alimentos), así como las instituciones que organizan dichas actividades (por ejemplo, políticas, leyes y contratos). Durante la última década, una gran labor de investigación ha permitido una mejor comprensión de estos sistemas, especialmente en términos de cómo pueden verse afectados por los cambios en el clima, que incluyen niveles del mar más altos, temperaturas mayores, cambios en la precipitación y un aumento de la acidificación del océano. Con la percepción de que el ANMM es la mayor amenaza inducida por el cambio climático (Wong y otros, 2014), la inundación y la erosión de la costa y la intrusión salina se han convertido en cuestiones urgentes que requieren un análisis detallado. Sin embargo, los generadores de los impactos no son solo de origen climático, sino que también están relacionados con las actividades humanas, como un desarrollo socioeconómico insostenible y la urbanización incontrolada.

Además de la detección de los impactos observados, la evaluación de los riesgos del cambio climático requiere la identificación de los sectores naturales y humanos que pueden estar expuestos a los impactos seleccionados (véase el diagrama 3). A este respecto, el ANMM y los eventos climáticos extremos pueden afectar a las viviendas, instalaciones recreativas e infraestructuras localizadas en la costa (Hadley, 2009). El sector turismo es también preocupante, pues muchas comunidades costeras dependen en gran medida de él. Otros sectores especialmente relevantes son la población, los ecosistemas y la agricultura. Dada la necesidad de una visión holística de los riesgos y las consecuencias, es preciso aplicar enfoques multisectoriales capaces de cubrir explícitamente todos aquellos sectores estratégicos que mejor representan el funcionamiento del sistema objeto de estudio.

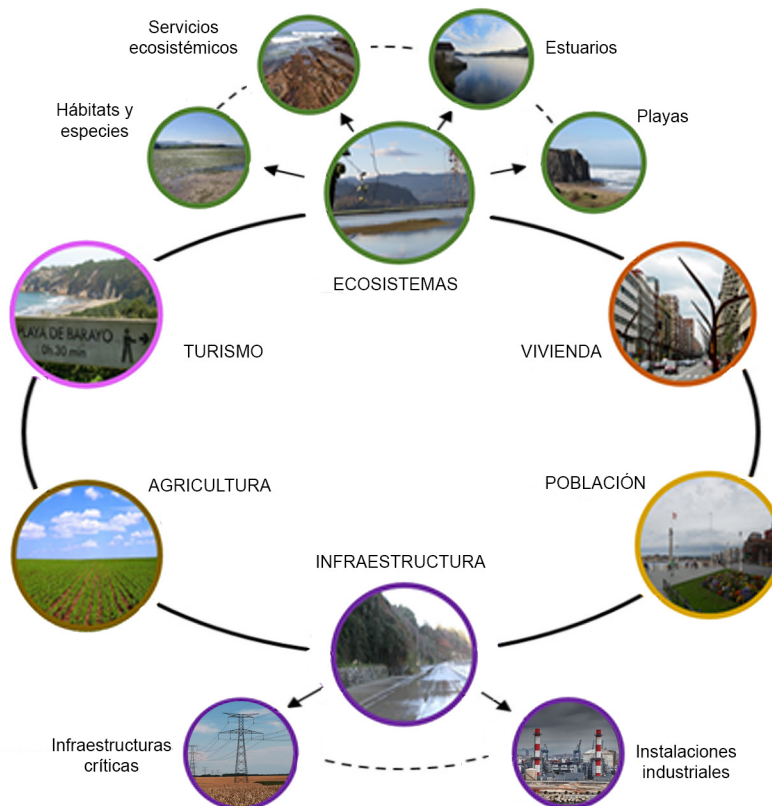


**Diagrama 2**  
**El riesgo sobre los sistemas costeros**



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de P.P. Wong y otros, “Coastal systems and low-lying areas”, Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2014.

**Diagrama 3**  
**Ejemplo de sectores estratégicos para los sistemas costeros**



Fuente: Elaboración propia sobre la base de A. Toimil, “A framework for the multi-sectoral assessment of climate change risks in coastal areas”, tesis para optar al grado de doctorado, Santander, Universidad de Cantabria, 2018.

## B. Los componentes del riesgo

### 1. Peligrosidad

La inundación y la erosión de la costa resultan de la combinación de condiciones de oleaje, marea meteorológica y marea astronómica. Aunque hay poca o ninguna evidencia de cualquier cambio futuro detectable en el clima de tormenta (asociado al oleaje y a la marea meteorológica) (SREX, 2012), debido al ANMM, los umbrales de nivel del mar extremos se alcanzarán con mayor frecuencia (Horsburgh y otros, 2017). El oleaje cumple un papel fundamental en el impacto y rebase de las defensas costeras, así como en la alteración de los patrones de erosión y acreción de la línea de costa (Wong y otros, 2014). Como el nivel medio del mar aumenta cada vez más rápido, muchas zonas costeras bajas podrán verse inundadas de forma permanente, permitiendo además que el oleaje penetre más tierra adentro, causando mayores daños. En las regiones macromareales, la marea meteorológica de tormenta representa una amenaza importante cuando coincide con mareas vivas equinocciales, dando lugar a graves inundaciones y exacerbando el retroceso de la línea de costa.

Para analizar históricamente la peligrosidad, pueden utilizarse diversas fuentes de datos. Los datos instrumentales (de mareógrafo o satélite) son los más fiables, pero existen limitaciones en lo que respecta a su cobertura temporal y espacial. Por lo tanto, los datos de reanálisis obtenidos de modelos numéricos son los más utilizados, ya que permiten continuar con largas series temporales para analizar la variabilidad interanual y las estadísticas de extremos, conocimientos esenciales para caracterizar los riesgos y elaborar estrategias de gestión.

Los escenarios de cambio climático son un aspecto fundamental en la evaluación de los riesgos del cambio climático. El aumento de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera produce cambios en el sistema climático en una serie de escalas temporales que afectan al medio físico de la costa. Los cambios en las dinámicas climáticas, incluido el ANMM, se proyectan para diferentes escenarios basados en trayectorias de concentración representativas (RCP) de GEI (Moss y otros, 2010). La selección de los escenarios de cambio climático para proyectar las dinámicas generadoras de impactos depende del año horizonte de interés. Para el corto plazo, el método más apropiado es la extrapolación de tendencias, mientras que, para el medio y largo plazo, las técnicas más recomendadas se basan en métodos dinámicos o estadísticos. Estas técnicas permiten obtener proyecciones regionales o locales, aumentando la resolución de los modelos, en el primer caso, y estableciendo relaciones estadísticas, en el segundo. Hay diversos pros y contras que deben ser considerados a la hora de usar una u otra técnica (véase el cuadro 1).

En general, cuando se dispone de datos atmosféricos, el *downscaling* estadístico puede ser considerado una buena alternativa, ya que es particularmente adecuado para obtener simulaciones a largo plazo con una elevada resolución espacial y utilizando un gran número de modelos de circulación general (GCM), lo que permite reducir la incertidumbre (Camus y otros, 2014).

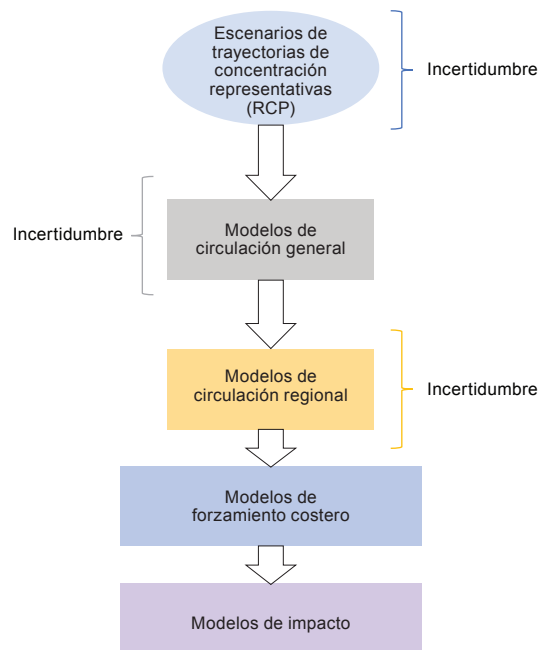
Uno de los mayores inconvenientes de trabajar con escenarios a largo plazo es la gran incertidumbre asociada, sobre todo cuando la escala del análisis es muy detallada. Otras fuentes de incertidumbre son las relativas a las aproximaciones, los métodos y las herramientas utilizadas que propagan e incrementan la incertidumbre inherente a los datos a lo largo de todo el proceso (véase el diagrama 4). Así, cada paso introduce incertidumbre, desde los escenarios de trayectorias de concentración representativas de gases de efecto invernadero, a través de los modelos de circulación general y regional, de los modelos de forzamiento costero, hasta el modelo de impacto. En este sentido, la realización de múltiples ejecuciones del modelo de impacto permite la cuantificación de la incertidumbre y su transferencia a términos de riesgo.

**Cuadro 1**  
**Fortalezas y debilidades de los métodos de regionalización (*downscaling*) estadístico y dinámico**

<i>Downscaling</i> estadístico	<i>Downscaling</i> dinámico
Fortalezas	
Computacionalmente eficiente. Solo requiere la salida de los modelos de circulación general (GCM) a escala diaria o mensual. Puede relacionar directamente la salida de los GCM a variables relevantes para impactos que no han sido simuladas por modelos climáticos. Se puede aplicar a cualquier variable observada de forma consistente. Puede proporcionar estimaciones locales. Permite realizar múltiples ejecuciones para cuantificar la incertidumbre.	Consiste explícitamente en procesos físicos de larga y pequeña escala, según la resolución del modelo. La respuesta climática regional es consistente con el forzamiento global. Proporciona datos coherentes en tiempo y espacio y para muchas variables climáticas. Puede emplearse en regiones donde no se dispone de observaciones.
Debilidades	
Basado en la hipótesis inverificable de que la relación estadística entre predictores y predictandos permanece constante en el tiempo. Sensible a la elección de predictores y a la capacidad de los GCM de simular esos predictores. Tiende a subestimar la varianza temporal. Requiere datos observados durante un largo período de tiempo.	Asume que los esquemas de parametrización de la malla permanecen constantes ante alteraciones en el clima. Sensibles a las condiciones iniciales de los GCM. Muy costosos computacionalmente. Dificultad para generar múltiples escenarios.

Fuente: Elaboración propia sobre la base de A. Toimil, “A framework for the multi-sectoral assessment of climate change risks in coastal areas”, tesis para optar al grado de doctorado, Santander, Universidad de Cantabria, 2018.

**Diagrama 4**  
**Cascada de incertidumbre en la caracterización de impactos del cambio climático**



Fuente: Elaboración propia sobre la base de A. Toimil, “A framework for the multi-sectoral assessment of climate change risks in coastal areas”, tesis para optar al grado de doctorado, Santander, Universidad de Cantabria, 2018.

## 2. Exposición

Teniendo en cuenta la naturaleza sectorial del marco propuesto, la exposición representa el número de personas, activos y flujos de actividades en la costa que pueden verse afectados por un impacto y en un escenario determinados. La estimación de la exposición responde generalmente a activos físicos (por ejemplo, edificios e infraestructuras), aunque también puede incluir los efectos indirectos asociados (De Moel y otros, 2015), como la producción agrícola, los servicios ecosistémicos y la recreación, entre otros. La información necesaria para caracterizar la exposición viene dada por los sectores que describen el funcionamiento del sistema de estudio, así como por los indicadores socioeconómicos que mejor los representan. De hecho, un mismo sector puede estar definido por más de un indicador, por ejemplo, el stock de capital residencial y la renta per cápita son dos indicadores económicos empleados para describir el sector vivienda. Los sectores y los indicadores socioeconómicos asociados dependen en gran medida del impacto que se va a analizar. Mientras que la erosión costera está limitada a las playas y no va más allá del frente costero, la inundación penetra tierra adentro, causando daños más diversos y sobre un número mayor de sectores. Por otro lado, las bases de datos de exposición no están siempre disponibles a la escala espacial requerida y pueden tener formatos diversos. Por ello, el principal reto surge no solo de la recopilación de datos que permitan una cobertura sectorial adecuada en toda la región de estudio, sino también de la necesidad de tratar la información a diferentes escalas espaciales de manera integrada. A ese respecto, existen técnicas que emplean datos auxiliares y factores correctores que, cuando son aplicables, mejoran la representación espacial de activos y flujos.

Las proyecciones de los datos de exposición representan otra cuestión relevante. Si bien es cierto que la exposición es dinámica y evoluciona con el tiempo, los cambios socioeconómicos no son fáciles de predecir. Las aproximaciones actuales incluyen proyecciones basadas en el crecimiento demográfico y económico (por ejemplo, Muis y otros, 2015), la extrapolación de tendencias observadas, así como la aplicación de autómatas celulares.

## 3. Vulnerabilidad

La vulnerabilidad tiene en cuenta el nivel de susceptibilidad al daño causado por la exposición a una peligrosidad dada, asociada con el clima y el cambio socioeconómico, y la falta de capacidad de adaptación. Además, la vulnerabilidad depende en gran medida del impacto considerado, del sector afectado por ese impacto y de la zona en la que se produce, y su análisis debe abordarse en consecuencia.

En el contexto de la inundación costera, las curvas de vulnerabilidad son ampliamente utilizadas para caracterizar el grado de daño sobre la población, los activos y los flujos representativos de las actividades expuestas a un determinado evento extremo. Hay que distinguir entre la vulnerabilidad social, relacionada con la población y sus condiciones, y la vulnerabilidad económica, asociada a bienes físicos y usualmente abordada a través de las conocidas funciones de daño. Estas últimas deben diferenciar consecuencias directas e indirectas y utilizar las métricas pertinentes. El caso más complejo es el de las infraestructuras críticas, cuya vulnerabilidad no responde a la propia estructura sino al sistema en el que se encuentra.

Sin embargo, la vulnerabilidad de las playas no está tan estudiada como la de otros activos y puede evaluarse desde diversos puntos de vista, como la biología, la protección costera y la recreación. En cualquier caso, para caracterizar la vulnerabilidad de una playa, es necesario tener en cuenta aquellos factores que puedan dañarla o alterar su funcionalidad.

## C. La estrategia para modelar impactos

Uno de los principales retos a los que nos enfrentamos cuando analizamos los riesgos del cambio climático es la elección de la estrategia más apropiada para modelar el impacto considerado. A este respecto, es necesario tener en cuenta los siguientes factores:

- **La región de estudio:** cada escala espacial requiere un tratamiento distinto. El coste computacional puede variar significativamente si la simulación de eventos debe realizarse a escala global, regional o local.
- **Los datos disponibles:** la resolución de la topografía y de la batimetría juega un papel decisivo tanto en la elección del esquema numérico a emplear como en la calidad de los resultados.
- **El tipo de análisis requerido:** dependiendo de si se requiere un análisis estadístico del riesgo o, por el contrario, únicamente deben simularse una serie de eventos históricos, el coste computacional exigirá una estrategia de modelado del impacto específica.
- **Presupuesto y tiempo:** los costes y plazos tienen gran influencia en las decisiones de planificación.

Por ejemplo, en el caso de la inundación costera, el área de estudio es uno de los factores más limitantes cuando tenemos que definir qué estrategia de modelado vamos a seguir. Principalmente, podemos distinguir tres escalas geográficas: global/continental O ( $>1000$  km), regional O (10-1000 km) y local O (1-10 km). Al mismo tiempo, es importante considerar la resolución de los datos de peligrosidad y exposición disponibles y asegurarnos de que es consistente. A escala global/continental se suelen emplear dos aproximaciones. La más simple se basa en índices que, en función de la peligrosidad y la exposición, determinan la gravedad del impacto. Un segundo método consiste en combinar un MDT de entre 30 y 90 m de resolución y el BTM. Por el contrario, cuando se trabaja a escala regional o local, es necesario trabajar con datos más precisos. Por ejemplo, la resolución mínima del MDT debe ser del orden de 5 m, aunque para estudios muy detallados es recomendable bajar a 1-2 m. A estas escalas existen metodologías con distintos niveles de complejidad y coste computacional. Se pueden emplear modelos de procesos que permiten resolver la hidrodinámica en la zona de rompientes con mucha precisión (Liu y Losada, 2002; Losada y otros, 2008; Lara y otros, 2011) o sustituirlos por formulaciones semiempíricas (Stockdon y otros, 2006; Pullen y otros, 2007), mucho menos sofisticadas pero que funcionan bien dentro su rango de aplicabilidad. A su vez, las condiciones de contorno obtenidas pueden introducirse en un modelo de inundación 2D o utilizarse para cortar la topografía (BTM). Finalmente, es fundamental tener en cuenta el tipo de análisis que va a realizarse. Este puede ser forense, es decir, limitado a reproducir determinados eventos históricos, o probabilístico. El análisis probabilístico se puede llevar a cabo sobre las condiciones generadoras de la inundación (McMillan y otros, 2011) o bien sobre el propio impacto, teniendo en cuenta la combinación de las diferentes dinámicas (Leonard y otros, 2014). En este último caso, la estrategia numérica elegida deberá, además, permitir la simulación de un elevado número de condiciones dinámicas con un tiempo de computación asequible.

Por otra parte, y además de los factores condicionantes descritos al principio de esta subsección, las estrategias de modelado de la erosión se ven particularmente limitadas por la escala temporal en la que los procesos litorales producen cambios en la línea de costa.

## D. La evaluación del riesgo y las consecuencias

El análisis del riesgo y las consecuencias puede realizarse a diferentes escalas geográficas, lo que a su vez está ligado a distintos objetivos de gestión y adaptación. Así, en términos de escala espacial, se puede distinguir entre micro O (1-10 km), meso O (10-1000 km) y macro O ( $>1000$  km). Con respecto al nivel de gestión, si bien el estudio a escala micro trata de identificar medidas de adaptación específicas, la evaluación a escala macro busca establecer políticas globales de reducción de riesgos. En medio, los análisis a nivel meso tienen como objetivo el desarrollo de planes regionales y estrategias para la adaptación al cambio climático. La disponibilidad y la calidad de los datos necesarios y la resolución de los resultados deberán ser acordes a la escala a la que se vaya a realizar el análisis (véase el cuadro 2).



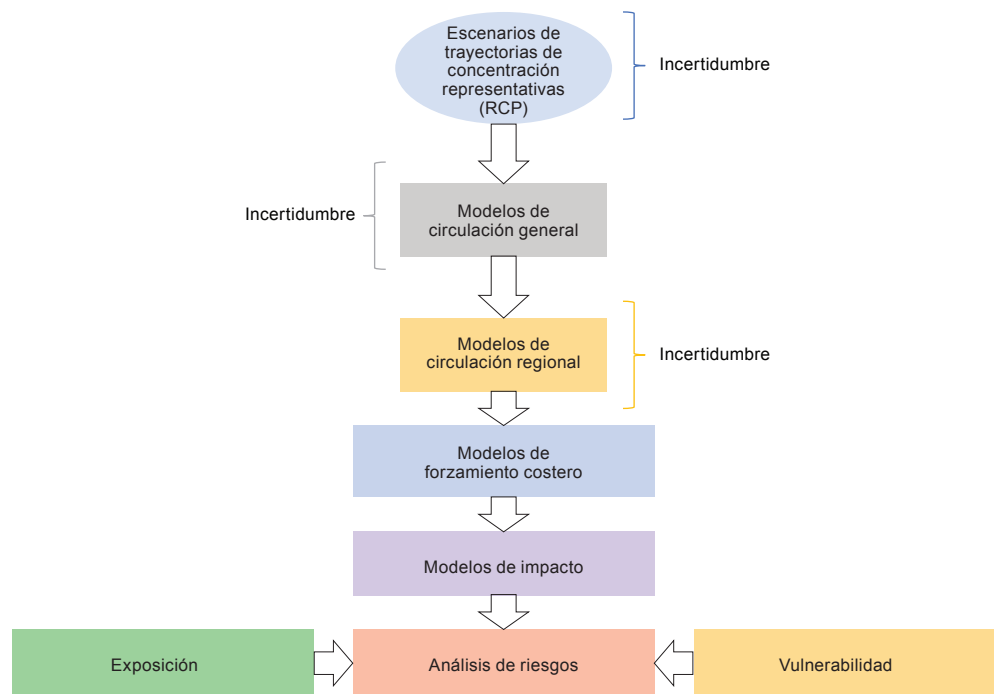
**Cuadro 2**  
**Escalas espaciales para el análisis de riesgos**

Escala	Alcance del análisis	Nivel de gestión	Precisión de los resultados	Disponibilidad de datos de partida	Resolución de los datos de partida
Macro	(Inter)nacional	Políticas globales de reducción de riesgos	Baja	Baja	Baja
Meso	Regional	Estrategias de adaptación	Media	Media	Alta
Micro	Local	Medidas de adaptación	Alta	Alta	Alta

Fuente: Elaboración propia sobre la base de A. Toimil, “A framework for the multi-sectoral assessment of climate change risks in coastal areas”, tesis para optar al grado de doctorado, Santander, Universidad de Cantabria, 2018.

Las evaluaciones de riesgos pueden adoptar diversas formas y niveles de complejidad, pero todas contribuyen a la toma de decisiones (Simmons y otros, 2017b). A este respecto, es importante diferenciar los conceptos de riesgo y consecuencias, saber a qué hacen referencia y cómo se calculan. Si bien el riesgo se calcula mediante la integral de todas las probabilidades de ocurrencia de los eventos posibles y se expresa comúnmente como pérdidas anuales esperadas (PAE) o daño anual esperado (DAE), las consecuencias se obtienen directamente de las pérdidas o daños asociados a eventos individuales. Así, el riesgo se obtiene probabilísticamente y las consecuencias son deterministas. Aunque existe un acuerdo generalizado sobre la necesidad de huir de métodos deterministas hacia marcos probabilísticos, los primeros pueden ser apropiados si se quiere dar respuesta a una pregunta concreta, en caso de que no sea posible realizar un análisis estocástico, o incluso si se está trabajando a escalas más allá de la local y con un gran número de sectores y escenarios. Los análisis probabilísticos buscan abordar todos los posibles eventos y sus probabilidades, proporcionando las bases para la toma de decisiones basada en riesgos y permitiendo una cuantificación robusta de la incertidumbre (Ranasinghe, 2016) (véase el diagrama 5).

**Diagrama 5**  
**Cascada de incertidumbres en la cuantificación del riesgo derivado del cambio climático**



Fuente: Elaboración propia sobre la base de A. Toimil, “A framework for the multi-sectoral assessment of climate change risks in coastal areas”, tesis para optar al grado de doctorado, Santander, Universidad de Cantabria, 2018.

## **E. La implementación del marco**

El análisis de los riesgos de inundación y erosión se ha convertido en una de las prioridades de las políticas de gestión de riesgos y adaptación al cambio climático en la costa. Los graves acontecimientos pasados han demostrado las terribles implicaciones que estos impactos pueden tener en los sistemas naturales y humanos, planteando serios desafíos para los responsables de políticas, ingenieros y ambientalistas de todo el mundo. A continuación, se muestra cómo puede implementarse el marco desarrollado para la evaluación multisectorial de las consecuencias de la inundación costera y de los riesgos derivados de la erosión. Es importante señalar que, si bien el marco está enfocado en el análisis regional o local (análisis de detalle), asumiendo ciertas simplificaciones, puede aplicarse a escalas geográficas mayores.

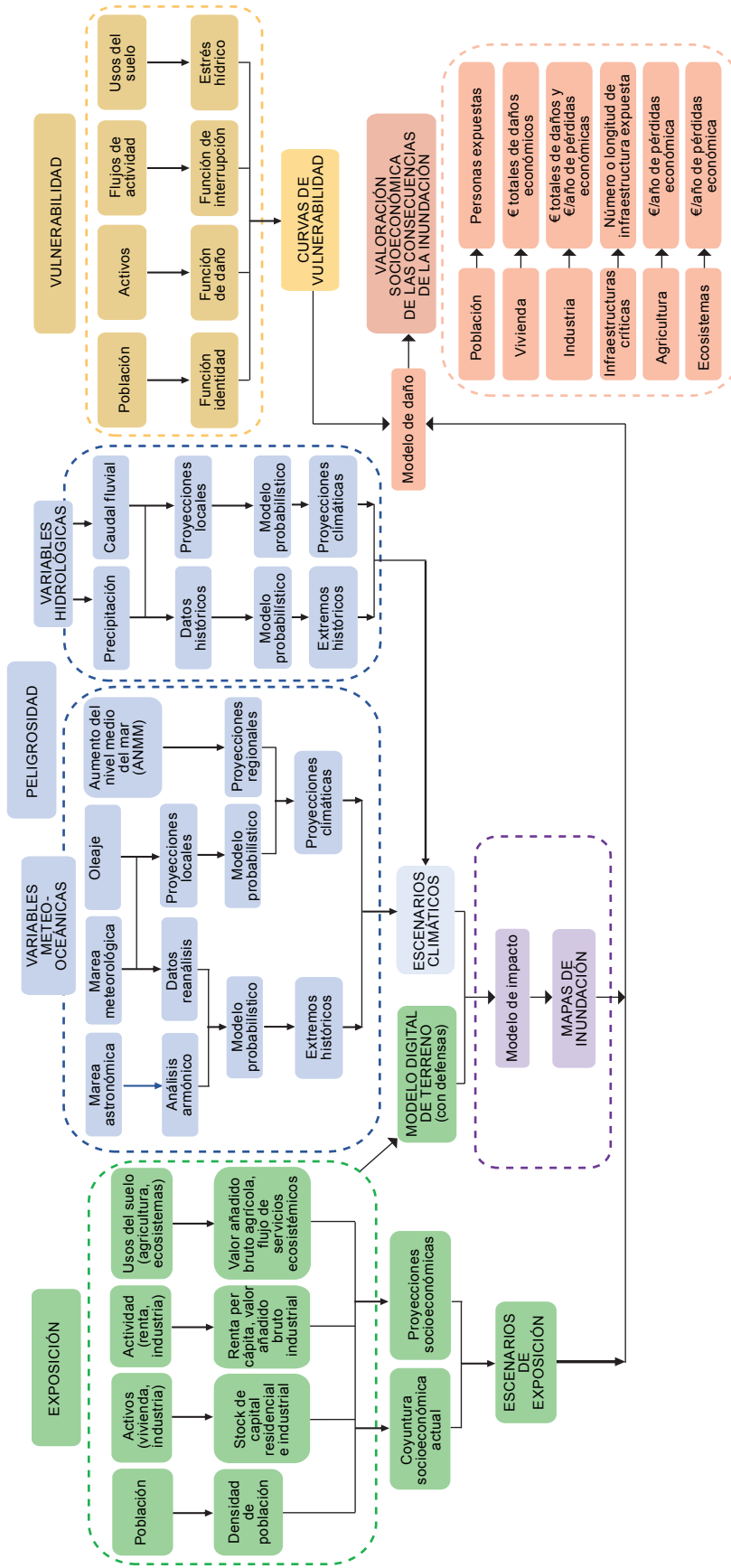
### **1. Implementación del marco para el estudio de la inundación costera**

La metodología propuesta (véase el diagrama 6) consiste en un proceso multinivel en el que la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad se desarrollan de forma individual y finalmente se integran para obtener las consecuencias del riesgo en términos socioeconómicos. Para ello, se construye un conjunto de escenarios climáticos combinando eventos extremos y cambios futuros a medio y largo plazo. A continuación, se emplea un modelo de impacto que tiene en cuenta la topografía subyacente para generar los mapas de inundación. El modelo puede alimentarse con series temporales de cota de inundación (CI) o de caudal de rebase en las que el componente del oleaje se obtiene a través de formulación empírica o modelado numérico, pero también con precipitación y/o descarga fluvial, según proceda. La exposición se define, para la situación actual y para el futuro, a través de los sectores población, vivienda, industria, infraestructuras críticas, agricultura y ecosistemas, y sus correspondientes indicadores socioeconómicos. En cuanto a la vulnerabilidad, se aplican funciones de daño específicas para los activos y funciones de interrupción de la actividad para los flujos económicos. Por último, los mapas de inundación, los datos de exposición y las curvas de vulnerabilidad se integran en un modelo de daños. Como resultado, se obtienen las consecuencias del cambio climático multisectoriales para un conjunto de escenarios de riesgo que combinan cambios en el clima y en la coyuntura socioeconómica.

### **2. Implementación del marco para el estudio de la erosión costera**

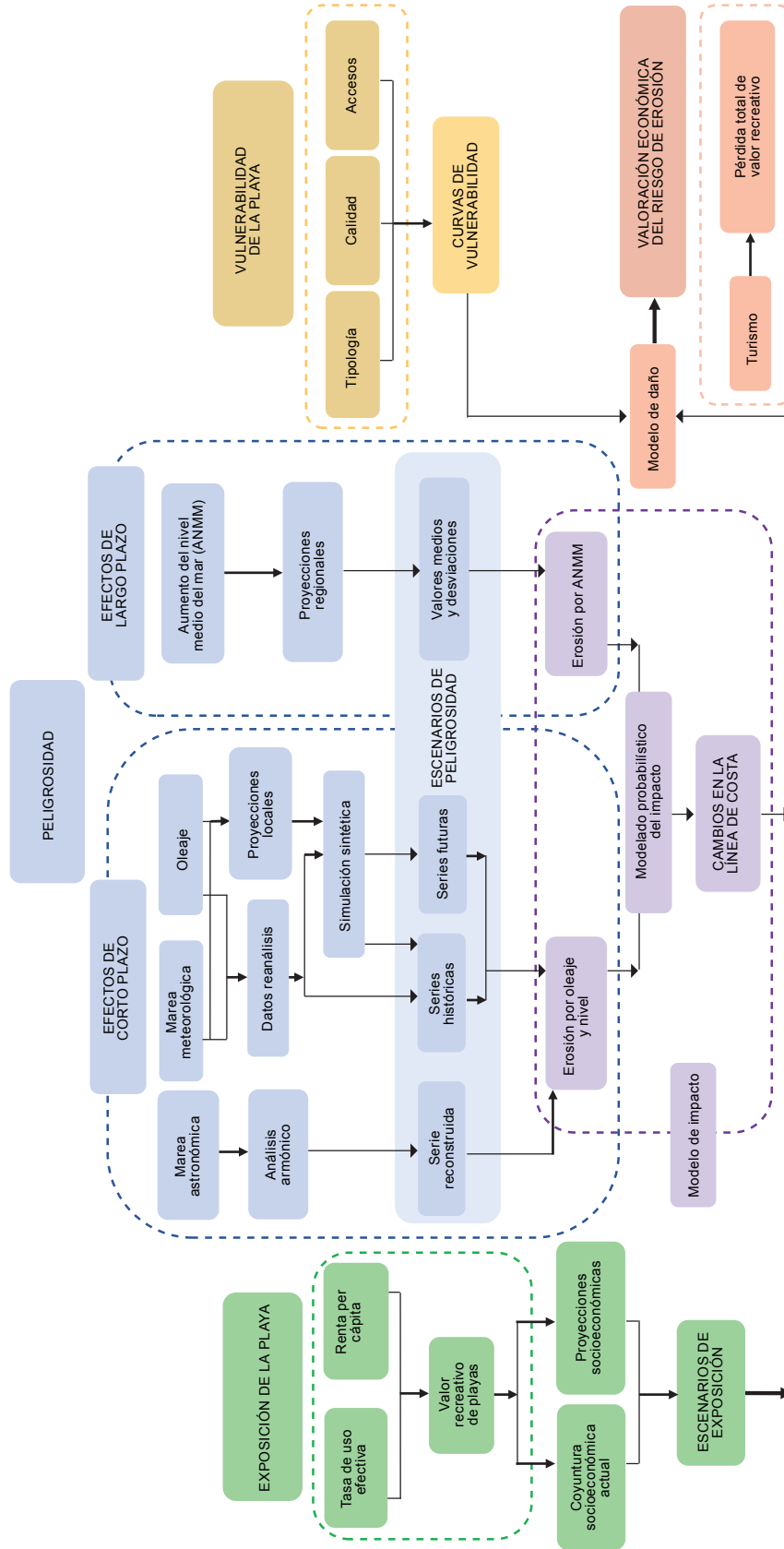
La metodología propuesta (véase el diagrama 7) se compone de un proceso multinivel en el que la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad se desarrollan de forma individual y finalmente se integran para obtener estimaciones probabilísticas del riesgo en términos económicos. Para ello, se identifican y caracterizan las dinámicas climáticas históricas y proyectadas responsables de la erosión de las playas. Así, el modelo de impacto proporciona los cambios en la línea de costa asociados al clima actual y futuro. Para tal fin, se alimenta de las dinámicas climáticas en forma de series temporales de oleaje, marea meteorológica, marea astronómica y ANMM, lo que permite tener en cuenta los efectos de la agrupación de tormentas y la recuperación entre tormentas. Miles de simulaciones posibilitan el análisis probabilístico del retroceso de la línea de costa. La exposición se representa a través del valor recreativo de las playas, que puede obtenerse utilizando una aproximación que combina la renta per cápita y aspectos relativos al comportamiento de los usuarios. En este caso, la vulnerabilidad se describe a partir de criterios ambientales y sociales, pero también se tienen en cuenta las características, la calidad y los servicios específicos de cada playa. El último paso requiere que las tasas de erosión se combinen con el valor recreativo de la playa y sus atributos de vulnerabilidad, para obtener probabilísticamente el riesgo de pérdida de valor recreativo de los escenarios considerados.

**Diagrama 6**  
**Marco de riesgo para el estudio de la inundación costera**



Fuente: Elaboración propia sobre la base de A. Toimil, "A framework for the multi-sectoral assessment of climate change risks in coastal areas", tesis para optar al grado de doctorado, Santander, Universidad de Cantabria, 2018.

**Diagrama 7**  
**Marco de riesgo para el estudio de la erosión costera**



Fuente: Elaboración propia sobre la base de A. Toimil, “A framework for the multi-sectoral assessment of climate change risks in coastal areas”, tesis para optar al grado de doctorado, Santander, Universidad de Cantabria, 2018.





## II. Análisis de la inundación costera

### A. Modelado del impacto

La inundación costera depende esencialmente de la marea meteorológica (MM), la marea astronómica (MA), el oleaje en forma de remonte (Ru) y el aumento del nivel medio del mar (ANMM). Estas variables se combinan, dando lugar a la llamada cota de inundación (CI), que es el nivel que alcanza el mar cuando se produce un evento de inundación:

$$CI = MM + MA + Ru + ANMM \quad (1)$$

La mayor complejidad viene dada por la contribución del oleaje. Cuando este se propaga hacia la costa genera un aumento del nivel del mar (remonte) del que se distinguen dos componentes: la sobreelevación del nivel debida a la transferencia de flujo de momento del oleaje a la columna de agua durante el proceso de rotura de las olas (sobre elevación por rotura) y el recorrido vertical de la salpicadura de la ola al romper (ascenso-descenso), debido a la onda corta y a la infragravitatoria. El remonte debido a la rotura del oleaje puede aproximarse mediante formulaciones semiempíricas en función de las condiciones de oleaje o bien a través del uso de modelos numéricos capaces de simular la hidrodinámica de rompientes con elevado coste computacional, limitando la escala espacial de aplicabilidad.

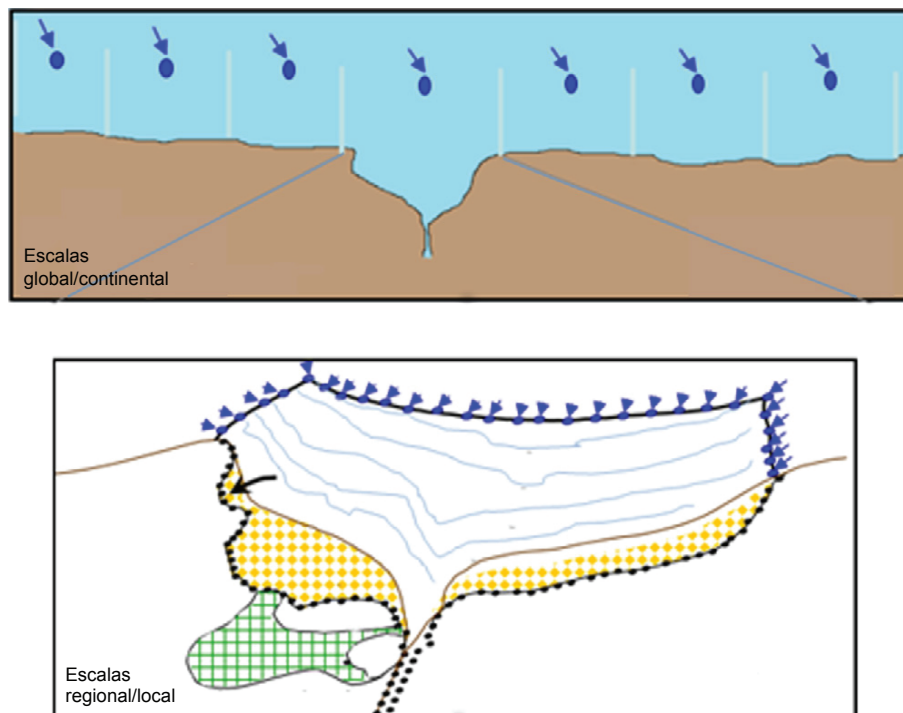
La escala del estudio condiciona en gran medida la estrategia de inundación a seguir. Se pueden distinguir tres escalas: global/continental, regional (O (10-100 km)) y local (O (10-100 m)). Paralelamente a la escala espacial, es necesario tener en cuenta la resolución de los datos disponibles, tanto de las dinámicas generadoras de la inundación (peligrosidad) como de los datos de exposición (ligados a las características físicas del entorno). Por tanto, debe existir coherencia y homogeneidad entre las diferentes fuentes de información, la escala de la zona de estudio y el tipo de análisis a realizar.

A escala global/continental se emplean fundamentalmente dos aproximaciones. La más sencilla está basada en un índice que engloba la peligrosidad y la exposición y categoriza el impacto de inundación en diferentes niveles de gravedad. Este índice puede estar compuesto a su vez por diversos indicadores que contengan información sobre la magnitud de la peligrosidad, la influencia de las diferentes dinámicas y las características topográficas y rugosidad del terreno (pendiente, tipo de costa). La segunda aproximación requiere la disponibilidad de un Modelo Digital del Terreno (MDT) con una resolución mínima deseable

del orden de los 30-60 m para la caracterización de la exposición. La inundación se obtiene mediante la intersección de la cota que alcanza el nivel del mar (originado por diferentes dinámicas) con el MDT (Método *Bathtub*, el volumen de agua que entra en el dominio es infinito y todo el terreno por debajo de un determinado nivel queda inundado).

El estudio de la inundación a escala tanto regional como local implica una caracterización a una alta definición y requiere la disponibilidad de las dinámicas a alta resolución (véase el gráfico 1). El MDT debe tener una resolución horizontal del orden de 5 metros, aunque en el caso de tratarse de un análisis a escala local lo óptimo es que proporcione un dato de elevación cada 1-2 metros y una resolución vertical inferior al nivel de los eventos extremos característicos. Se pueden diferenciar tres estrategias distintas (véase el gráfico 2). La diferencia entre las estrategias A y B (B1-B2) radica en el modelo numérico utilizado para la estimación de la extensión y cota de inundación. En la estrategia A se utilizan modelos numéricos complejos que resuelven los componentes de la sobreelevación del nivel del mar debido a la rotura del oleaje de forma muy precisa. La inundación se determina a partir de la intersección de la cota de inundación, definida a partir de todos sus componentes, con el MDT. En el caso de las estrategias tipo B, la inundación en tierra se simula mediante un modelo de inundación 2D, que puede estar forzado por dinámicas costeras (nivel del mar total o caudal de rebase) y dinámicas continentales (precipitación, escorrentía o caudal fluvial). El grado de definición de la condición de contorno marina diferencia las dos versiones de la estrategia B. La estrategia B1 requiere modelos numéricos para la simulación de la sobreelevación del nivel debido a la rotura del oleaje o del caudal de rebase. En la estrategia B2 se aplican fórmulas semiempíricas para la definición de esta condición de contorno (Stockdon y otros, 2006; Eurotop, 2007).

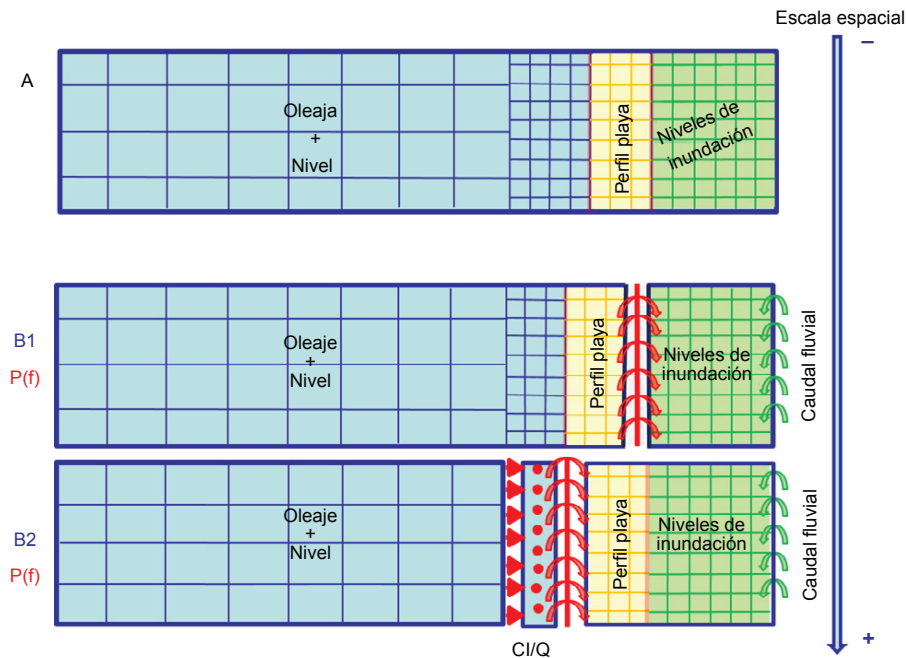
**Gráfico 1**  
**Escala espacial del estudio de inundación**



Fuente: A. Toimil, I.J. Losada y P. Camus, “Metodología para el análisis del efecto del cambio climático en la inundación costera: aplicación a Asturias”, RIBAGUA, vol. 3, 2016.

Nota: Los puntos azules corresponden a las dinámicas marinas.

**Gráfico 2**  
Estrategias numéricas para el estudio de la inundación a escala regional/local



Fuente: A. Toimil, I.J. Losada y P. Camus, “Metodología para el análisis del efecto del cambio climático en la inundación costera: aplicación a Asturias”, RIBAGUA, vol. 3, 2016.

Durante estos últimos años se han desarrollado diferentes tipos de modelos numéricos para la simulación de la zona de rompientes con diferente grado de complejidad según las ecuaciones que resuelven (Liu y Losada, 2002; Losada y otros, 2008; Lara, Ruju y Losada, 2011; Zijlema, Telling y Smit, 2011). Los más sofisticados requieren un elevado coste computacional, presentan problemas de inestabilidad y su versión 2D más asequible conlleva cierta incertidumbre en la determinación de la extensión superficial de la inundación. Otros modelos que resuelven las ondas infragravitatorias permiten obtener la parte del remonte asociado a este tipo de ondas con un tiempo de computación aceptable (Roelvink y otros, 2009; McCall y otros, 2014). En cuanto a los modelos de inundación en tierra, también existe una gama amplia de modelos que resuelven el fenómeno de inundación con diferente grado de aproximación (Bates y de Roo, 2000; Gouldby y otros, 2008; L’homme y otros, 2010; Jamieson y otros, 2012) y, por tanto, de esfuerzo computacional.

Por otro lado, la estrategia a aplicar está condicionada por el análisis que se quiera realizar, pudiendo distinguir fundamentalmente dos tipos: forense, limitado a una serie de eventos históricos, o probabilístico. El análisis probabilístico requiere la disponibilidad de datos históricos de las condiciones meteoceano-hidrológicas que generan la inundación y admite distintos tipos de caracterización estadística: unidimensional (Batstone y otros, 2013) o multidimensional (Serafin y Ruggiero, 2014), o de la aplicación de un generador estocástico para aumentar la población de eventos extremos (Gouldby y otros, 2014). Además, este análisis se puede realizar sobre las condiciones generadoras de la inundación (Environmental Agency, 2011) o sobre el impacto, teniendo en cuenta la combinación de las diferentes dinámicas (Leonard y otros, 2014). En este último caso, la estrategia numérica elegida debe permitir la simulación de un elevado número de condiciones dinámicas con un tiempo de computación asequible. Por tanto, la estrategia A está limitada a un análisis forense de la inundación, mientras que las estrategias B1 y B2 permiten un análisis probabilístico si los modelos elegidos para resolver la hidrodinámica del oleaje y de la inundación en tierra conllevan un esfuerzo computacional aceptable.

## B. Evaluación de las consecuencias del riesgo

La inundación costera es uno de los impactos del cambio climático más estudiados, especialmente en relación con el ANMM y sus efectos en los niveles del mar extremos (Wong y otros, 2014). En los últimos años, muchos estudios se han centrado en cuantificar el riesgo de inundación a diferentes escalas. Estos estudios varían desde aproximaciones basadas en indicadores que resuelven la propagación de la inundación en tierra mediante el método *Bathhtub* orientadas a las escalas global o continental (Reguero y otros, 2015; Muis y otros, 2016) hasta metodologías mucho más sofisticadas que incorporan modelado 2D o 3D y requieren recursos computacionales elevados que no son aplicables a escalas más allá de la local O (1-10 km) o a nivel multisectorial (Lin y otros, 2010; Harley y Ciavola, 2013). En medio se encuentran los análisis a escala regional O (10-1000 km), que pueden diferir en la estrategia de modelado, en la resolución de los datos climáticos y de exposición, e incluso en el alcance en términos de sectores estratégicos y resolución de los resultados. Por ejemplo, Hall, Sayers y Dawson (2005) emplearon mapas de inundación ya existentes para evaluar el incremento en el riesgo de inundación en el Reino Unido a escala nacional, proporcionando daños sobre población, propiedades domésticas y comerciales y producción agrícola con una resolución de 10 km. Más tarde, Gouldby y otros (2008) presentaron una metodología para evaluar el riesgo de inundación costera y fluvial a orillas de río Támesis. En su investigación, si bien se dio mucha importancia al desarrollo de un método eficiente de difusión de la inundación, solo se calcularon daños sobre propiedades residenciales y comerciales con una resolución espacial de 50 m. Por esa misma época, Mokrech y otros (2008) desarrollaron un metamodelo de inundación para evaluar impactos de inundación en las regiones de East Anglia y el noroeste de Inglaterra (proyecto RegIS). De forma similar a Hall, Sayers y Dawson (2005), estos autores exploraron el efecto del cambio climático en los estándares de protección para defensas costeras y fluviales sobre la base de mapas de inundación elaborados en estudios anteriores. Proporcionaron daños sobre propiedades residenciales, población, agricultura y ecosistemas para una serie de escenarios de riesgo y con una resolución de 5 km. En la misma región geográfica, Dawson y otros (2009) llevaron a cabo un análisis más detallado del riesgo de inundación empleando un modelo de inundación 2D. Si bien obtuvieron pérdidas de producción agrícola y daños sobre propiedades residenciales descontados con una resolución de 250 m, no se consideraron otros sectores. Más recientemente, como parte de un conjunto de estudios sobre los impactos del cambio climático en California, Heberger y otros (2011) analizaron los efectos del ANMM sobre la población y las infraestructuras en caso de no implementar medidas de adaptación. Si bien este último análisis tiene una buena cobertura sectorial, no se realiza ningún tipo de integración del riesgo ni de sus consecuencias. Finalmente, y pese a que para obtener una cuantificación robusta del riesgo es esencial caracterizar de forma adecuada las dinámicas generadoras del impacto, entre los estudios analizados, aunque todos tienen en cuenta el ANMM, solo el de Dawson y otros (2009) considera el oleaje.

## C. Propuesta metodológica para un análisis multisectorial de las consecuencias del riesgo de inundación costera a escala regional y con alta resolución

Una vez identificadas las potenciales áreas de mejora en las metodologías existentes, se propone una metodología para el análisis multisectorial de las consecuencias de la inundación costera inducida por el cambio climático a escala regional. Esta metodología responde al marco integrado de análisis de riesgos descrito en la sección II.E.1 de este documento y representado en forma de diagrama de flujo en el diagrama 6. Como puede observarse, se combina información climática de alta resolución espacio-temporal (bases de datos de reanálisis y proyecciones), datos locales de exposición para una amplia cobertura sectorial, funciones de vulnerabilidad específicas, la valoración de las consecuencias del riesgo de inundación a escala regional con una resolución espacial de 5 m y su posterior integración a través del uso de técnicas bayesianas y criterio experto. Esto último permite priorizar acciones de adaptación

y asegurar una asignación de fondos lo más eficiente posible. En lo que respecta al modelado de la inundación, se ha optado por la estrategia B2 (véase el gráfico 2). Para ello, además del empleo de bases de datos de dinámicas marinas y continentales y de un MDT de alta resolución, se tienen en cuenta las defensas costeras y los efectos locales del oleaje en puertos. La sobre-elevación del nivel debido a la rotura del oleaje se calcula mediante la aplicación de una formulación semiempírica debidamente calibrada para la reconstrucción de la condición de contorno marina y la caracterización de la propagación de la inundación en tierra se obtiene mediante el empleo de un modelo hidrodinámico bidimensional eficiente que considera la topografía subyacente y es sensible a la rugosidad de Manning. El cuadro 3 presenta las ventajas que ofrece la metodología propuesta con respecto a otros análisis de las consecuencias del riesgo de inundación a escala regional.

A continuación, se describen los aspectos más significativos de la metodología propuesta.

**Cuadro 3**  
**Resumen de los principales elementos de la metodología desarrollada y su comparación con la literatura existente**

	Metodología propuesta	Hall y otros (2005)	Gouldby y otros (2008)	Mokrech y otros (2008)	Dawson y otros (2009)	Heberger y otros (2011)
Escala	Regional O (100 km)	Regional O (1 000 km)	Regional O (10 km)	Regional O (100 km)	Regional O (10 km)	Regional O (1 000 km)
Modelado de la inundación	Modelado 2D	Mapas existentes	Modelado 2D	Mapas existentes	Modelado 2D	Método basado en el sistema de información geográfica (SIG) y mapas existentes
Defensas	Digitalizadas con planos	Estándares de protección	Estándares de protección	Estándares de protección	Incluidas	ND
Dinámicas marinas	Oleaje y nivel del mar (>60 años, alta resolución). Proyecciones locales de oleaje, MM y ANMM	ANMM relativo	ND	ANMM relativo	Oleaje y nivel del mar (23 años). Proyecciones de oleaje y ANMM	ANMM
Escenarios	Riesgo	Climáticos	Socio económicos	Riesgo	Riesgo	Climáticos
Sectores	Población, vivienda, industria, infraestructura, agricultura y ecosistemas (5 m)	Población, vivienda, industria y agricultura (10 km)	Vivienda e industria (50 m)	Población, vivienda, agricultura y ecosistemas (1 km)	Residencial/ no residencial y agricultura (250 m)	Población, vivienda e infraestructura (municipal)
Descuento	Sí	No	No	No	Sí	No
Integración del riesgo	Sí	No	No	No	No	No

Fuente: Elaboración propia sobre la base de A. Toimil y otros “Multi-sectoral high-resolution assessment of climate change consequences of coastal flooding”, *Climatic Change*, vol. 145, 2017.

Nota: ND: No disponible; ANMM: Aumento del nivel medio del mar; MM: marea meteorológica.

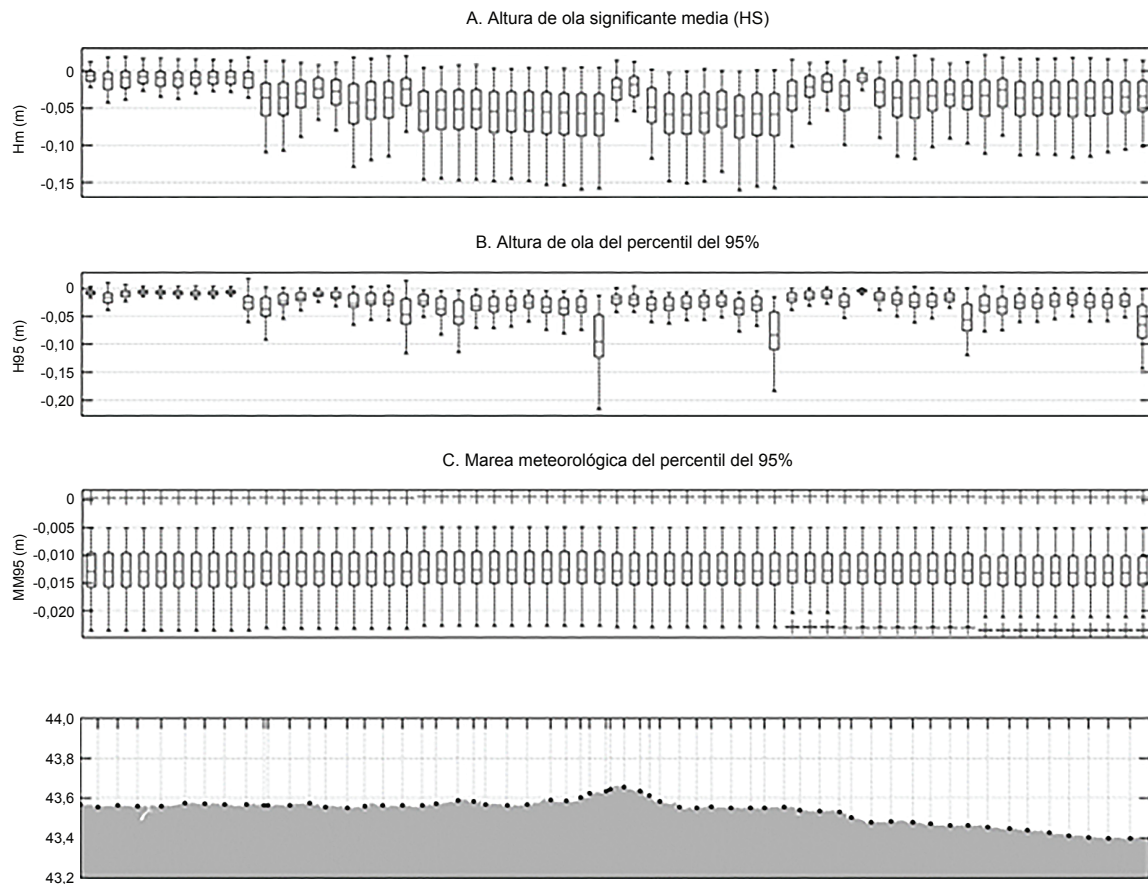
## 1. Peligrosidad

En lo que respecta a la caracterización de la peligrosidad histórica, la metodología propuesta combina bases de datos de reanálisis de oleaje y marea meteorológica de alta resolución espacio-temporal y la reconstrucción de la marea astronómica. Además, estas bases de datos deben tener una longitud temporal suficiente para poder realizar estadísticas de extremos, así como analizar la variabilidad estacional, interanual e interdecadal, aspectos esenciales para el análisis de riesgos. Si la naturaleza de la zona de estudio lo precisase, habría que tener también en cuenta el caudal fluvial y la precipitación.



En relación con la peligrosidad futura, si lo que se quiere es analizar las consecuencias del riesgo de inundación a medio y largo plazo, es fundamental trabajar con proyecciones locales, pues las proyecciones globales no proporcionan la información necesaria para este tipo de estudios. Si se dispone de datos atmosféricos, las técnicas de *downscaling* estadístico (sección II.A.1) permiten obtener proyecciones con una elevada resolución espacial y utilizar muchos GCM, lo que ayuda a reducir la incertidumbre. El gráfico 3 muestra, como ejemplo, las proyecciones estadísticas de oleaje y marea meteorológica realizadas en la costa del Principado de Asturias (345 km de costa del norte de España), con una resolución media de 800 m y 40 GCM. En lo que respecta al ANMM, aunque las proyecciones del IPCC son hoy en día la fuente más fiable, es importante trabajar también con la información que proporcionan los modelos semiempíricos (por ejemplo, Rahmstorf, 2007) o basados en datos paleoclimáticos (por ejemplo, Grinsted y otros, 2010) porque, aunque arrojan valores mucho más altos, la gestión del riesgo exige trabajar con todo el conocimiento existente.

**Gráfico 3**  
**Ejemplo de estadísticos de oleaje y marea meteorológica proyectados en la costa del Principado de Asturias (norte de España) entre 1979-2010 y 2071-2099**  
*(En metros)*



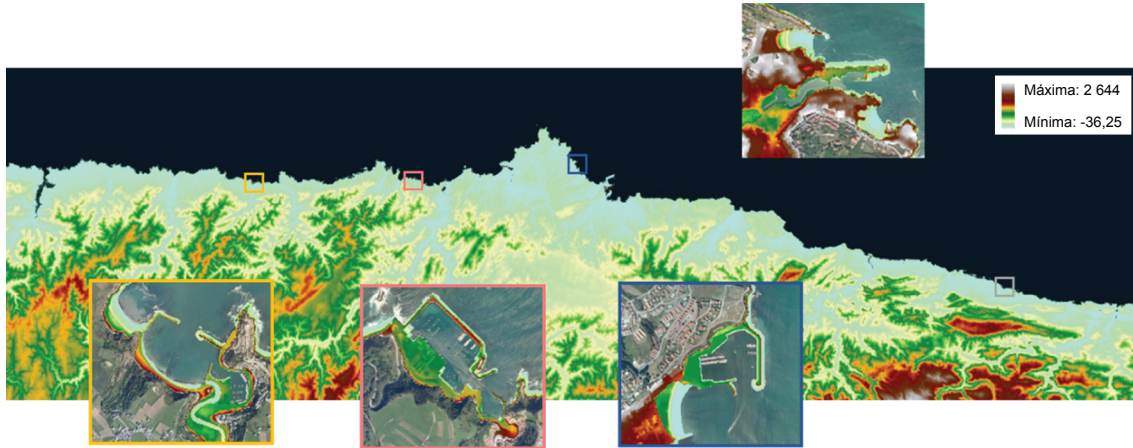
Fuente: Elaboración propia sobre la base de A. Toimil y otros “Multi-sectoral high-resolution assessment of climate change consequences of coastal flooding”, *Climatic Change*, vol. 145, 2017.

Nota: Cambios proyectados a partir de 40 modelos de circulación general (GCM) entre el período de referencia (1979-2010) y el período 2071-2099 para el escenario de trayectoria de concentración representativa (RCP) 8.5.

## 2. Exposición

Uno de los aspectos más importantes de la caracterización de la exposición es la utilización de un MDT de la resolución apropiada (sección III.A), que en este caso es en torno a 5 m. Además, es necesario disponer de una línea de costa de alta resolución que se ajuste perfectamente a la orografía de la zona de estudio y de las cotas de las defensas costeras (véase el gráfico 4). Para esto último, y siempre que sea posible, es recomendable realizar campañas de campo.

**Gráfico 4**  
**Ejemplo de Modelo Digital de Terreno (MDT) de la costa del Principado de Asturias**  
**mejorado con defensas costeras**



Fuente: Elaboración propia.

En lo que respecta a la faceta socioeconómica de la exposición, el primer paso es la identificación de aquellos sectores que resultan estratégicos para la zona en la que se está realizando el estudio. Los más habituales son: población, vivienda, industria, infraestructura, agricultura y ecosistemas. A continuación, debe recogerse información cuantificable que represente a estos sectores. Por ejemplo: densidad de población, stock de capital residencial, stock de capital y valor añadido bruto (VAB) industrial, unidades/km de infraestructuras críticas, VAB agrícola y flujo de servicios ecosistémicos. En este sentido, hay que discernir entre el valor del activo y el valor de la actividad que se desarrolla en ese activo o que está vinculada a él. Por ejemplo, para el sector industria es habitual emplear el valor añadido bruto o el producto interior bruto como indicador de la actividad y del stock de capital industrial como indicador del valor del activo en sí.

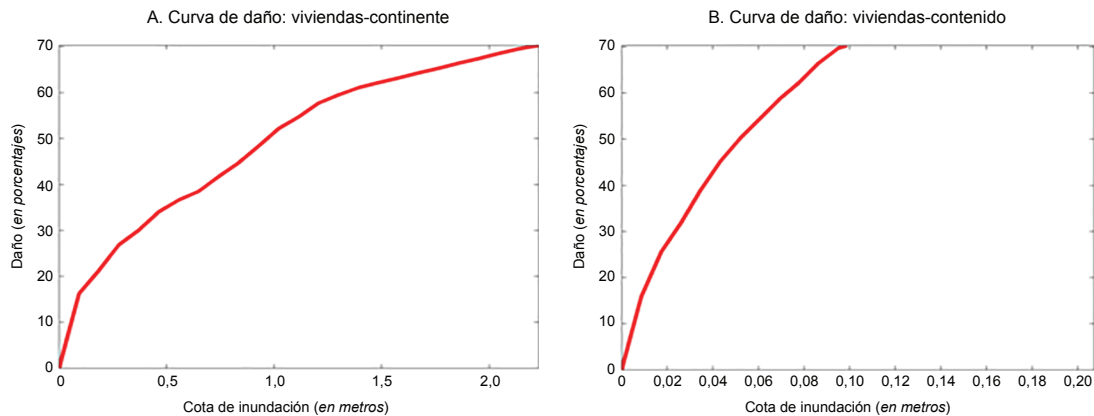
Dado que estos datos suelen encontrarse en distintos formatos y escalas espaciales, se recomienda utilizar técnicas de reducción de escala para tener información a la misma resolución que el MDT (5 m) y, cuando sea posible, aplicar factores correctores que permitan obtener representaciones lo más realistas posible. A este respecto, la renta per cápita puede servir para redistribuir el stock de capital repartido inicialmente de forma homogénea edificio a edificio. Esto permite tener en cuenta que las zonas en las que el poder adquisitivo es mayor tendrán viviendas mejores y más caras.

## 3. Vulnerabilidad

La caracterización de la vulnerabilidad debe hacerse mediante curvas de daño específicas para cada sector, distinguiendo el componente social del económico y diferenciando entre activos (estructura y contenidos) y actividad, de forma análoga a la exposición. Para la población es común utilizar la función identidad, que parte de la base de que el número de personas expuestas corresponde al número de personas en riesgo. Para los activos, si no se tienen datos empíricos que informen acerca de daños asociados a eventos pasados, se pueden utilizar como base funciones de daño existentes y adaptarlas. Por ejemplo, las funciones de HAZUS

(FEMA, 2013) permiten tener en cuenta el tipo de edificios (cimentación y cubierta) y materiales empleados en la construcción de inmuebles. El gráfico 5 muestra dos curvas de daño para edificios residenciales, una para el continente y otra para el contenido, considerando cimentación con zapata, muro de carga y cubierta con cerchas. Para interrupción de la actividad, en cambio, deben utilizarse funciones de pérdida de actividad, que relacionan la cota de inundación alcanzada con el número de días de parada operativa.

**Gráfico 5**  
**Ejemplo de curvas de daño adaptadas de HAZUS para las viviendas de la costa del Principado de Asturias en las que se ha considerado cimentación con zapata, muro de carga y cubierta con cerchas**



Fuente: Elaboración propia sobre la base de A. Toimil, “A framework for the multi-sectoral assessment of climate change risks in coastal areas”, tesis para optar al grado de doctorado, Santander, Universidad de Cantabria, 2018.

## 4. Modelado del impacto

Las bases de datos históricos de alta resolución de oleaje y marea meteorológica, así como la reconstrucción de la marea astronómica, permiten obtener la serie histórica de cota de CI a lo largo de la costa cada 500-1000 m. De acuerdo con la estrategia de modelado escogida (B2, gráfico 2), la contribución del oleaje a la CI se determina mediante formulación semiempírica (por ejemplo, Stockdon y otros, 2006), que debe ser calibrada adecuadamente con datos de campo. Otro aspecto importante para tener en cuenta es la consideración de los efectos locales del oleaje debido a la presencia de puertos. Conforme el oleaje se aproxima y propaga hacia la costa, sufre una transformación energética debida principalmente a la influencia de los contornos batimétricos, es decir, experimenta los efectos propios de la refracción, difracción, asomeramiento y disipación de energía debida a la fricción con el fondo. Por ello, cuando el oleaje se encuentra con estructuras de protección costera, la difracción hace que este se vea alterado significativamente. Este fenómeno se puede capturar de forma simplificada mediante ábacos o con mucha más precisión empleando un modelo numérico basado en la aproximación elíptica de la ecuación de la pendiente suave, que permite resolver los patrones estacionarios de propagación de oleaje y onda larga, reflexión y agitación dentro de puertos (GIOG, 1999). Para el cálculo de la CI futura, es necesario disponer de todas estas dinámicas proyectadas al horizonte considerado y hay que incluir el ANMM.

Para la estrategia de modelado seleccionada es preciso utilizar las series temporales de CI, ya sean históricas o futuras, a fin de alimentar un modelo de inundación en tierra. Hoy en día existe una amplia gama de modelos de inundación disponibles en la literatura que representan una herramienta fundamental en la gestión de los riesgos de inundación (Bates y de Roo, 2000; Gouldby y otros, 2008; L’homme y otros, 2010; Jamieson y otros, 2012). En este caso, la metodología propuesta opta por un modelo hidráulico 2D eficiente (Jamieson y otros, 2012), que emplea el método de almacenamiento de celdas y que cuenta con la topografía como subelemento de la malla computacional. Resuelve la aproximación difusiva de las *Shallow Water Equations* (SWE) e incorpora el término adicional de la inercia local, lo que proporciona mayor estabilidad y menores tiempos de ejecución (Bates, Horritt y Fewtrell, 2010). El

modelo es sensible a la rugosidad de Manning y permite tener en cuenta diversas fuentes de descarga de volúmenes de inundación, como la inundación costera (por rebase o por onda larga), la inundación fluvial y la precipitación, tanto de forma aislada como combinada. Esto es muy relevante dado que, muchas veces, la combinación de eventos no extremos de distinta naturaleza puede dar lugar a una situación de riesgo o de consecuencias negativas elevadas sobre los sistemas costeros.

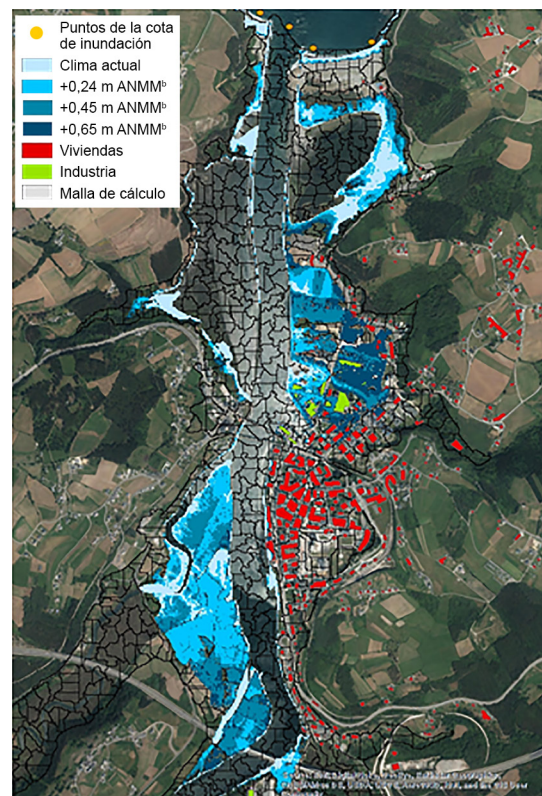
Así, se obtienen mapas de inundación con la misma resolución que el MDT. Como ejemplo, el gráfico 6 muestra la inundación asociada a la CI de 100 años de período de retorno para el clima actual y para distintos escenarios de ANMM en la ría de Navia, situada en el Principado de Asturias.

## 5. Estimación de las consecuencias del riesgo

Una vez obtenidos los mapas de inundación, estos deben cruzarse con los datos de exposición. El gráfico 6 muestra, como ejemplo, el cruce de los mapas de inundación obtenidos tras el modelado y los edificios de vivienda e instalaciones industriales identificados en la costa del Principado de Asturias. Así pues, siguiendo con este mismo ejemplo, se obtiene el valor del stock de capital de vivienda (continente y contenido), el valor del stock de capital industrial y el valor añadido bruto industrial expuestos. Estos valores de exposición se introducen en las curvas de vulnerabilidad correspondientes dando lugar, finalmente, a las consecuencias del riesgo, por ejemplo, sobre los sectores industria y vivienda, tal como figura en los gráficos 7 y 8, respectivamente. En este caso, dichas consecuencias se muestran agregadas a nivel municipal. Este procedimiento debe realizarse para cada uno de los escenarios de riesgo considerados. Se entiende por escenario de riesgo aquel que combina proyecciones climáticas y socioeconómicas.

Gráfico 6

**Inundación asociada al evento de 100 años de período de retorno, para el clima actual y para distintos aumentos del nivel medio del mar<sup>a</sup>, en la ría de Navia (Principado de Asturias)**



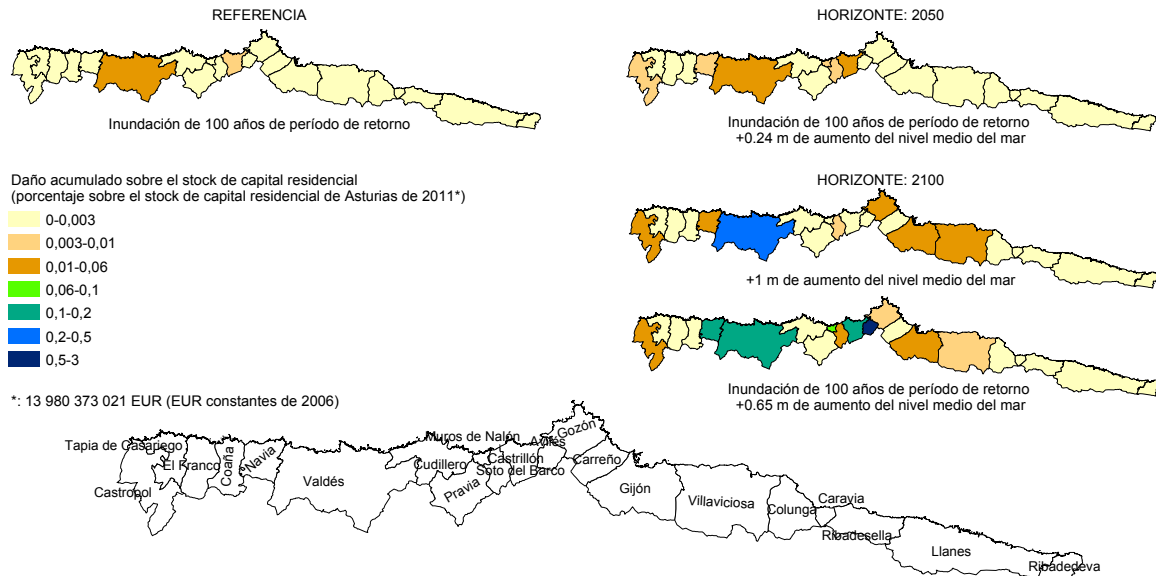
Fuente: Elaboración propia sobre la base de A. Toimil y otros “Multi-sectoral high-resolution assessment of climate change consequences of coastal flooding”, *Climatic Change*, vol. 145, 2017 .

<sup>a</sup> Aumentos de 0,24 m en 2015 y de 0,45 m (escenario RCP4.5) y 0,65 m (escenario RCP8.5) en 2100.

<sup>b</sup> Aumento del nivel medio del mar.

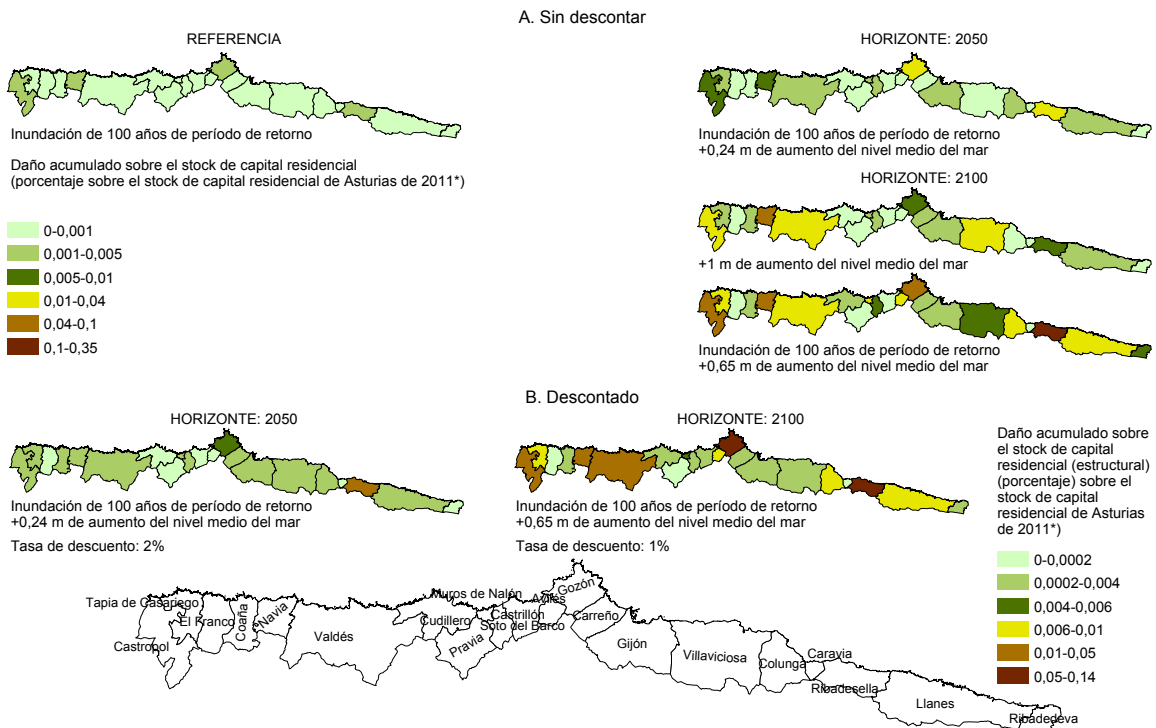


**Gráfico 7**  
**Distribución espacial de los daños estructurales debidos al impacto de inundación sobre los activos industriales de la costa del Principado de Asturias (sin descontar)**



Fuente: Elaboración propia sobre la base de A. Toimil, “A framework for the multi-sectoral assessment of climate change risks in coastal areas”, tesis para optar al grado de doctorado, Santander, Universidad de Cantabria, 2018.

**Gráfico 8**  
**Ejemplo de distribución espacial de los daños estructurales debidos al impacto de inundación sobre los activos residenciales de la costa del Principado de Asturias (descontados y sin descontar)**



Fuente: Elaboración propia sobre la base de A. Toimil, “A framework for the multi-sectoral assessment of climate change risks in coastal areas”, tesis para optar al grado de doctorado, Santander, Universidad de Cantabria, 2018.



Por otro lado, a la hora de evaluar las consecuencias futuras, es necesario poder comparar los resultados obtenidos para los horizontes considerados en el contexto socioeconómico actual. Esto es especialmente importante cuando se quieren implementar medidas de adaptación y nos da una idea del esfuerzo de inversión requerido hoy para evitar daños futuros. Para ello, es necesario aplicar una tasa de descuento.

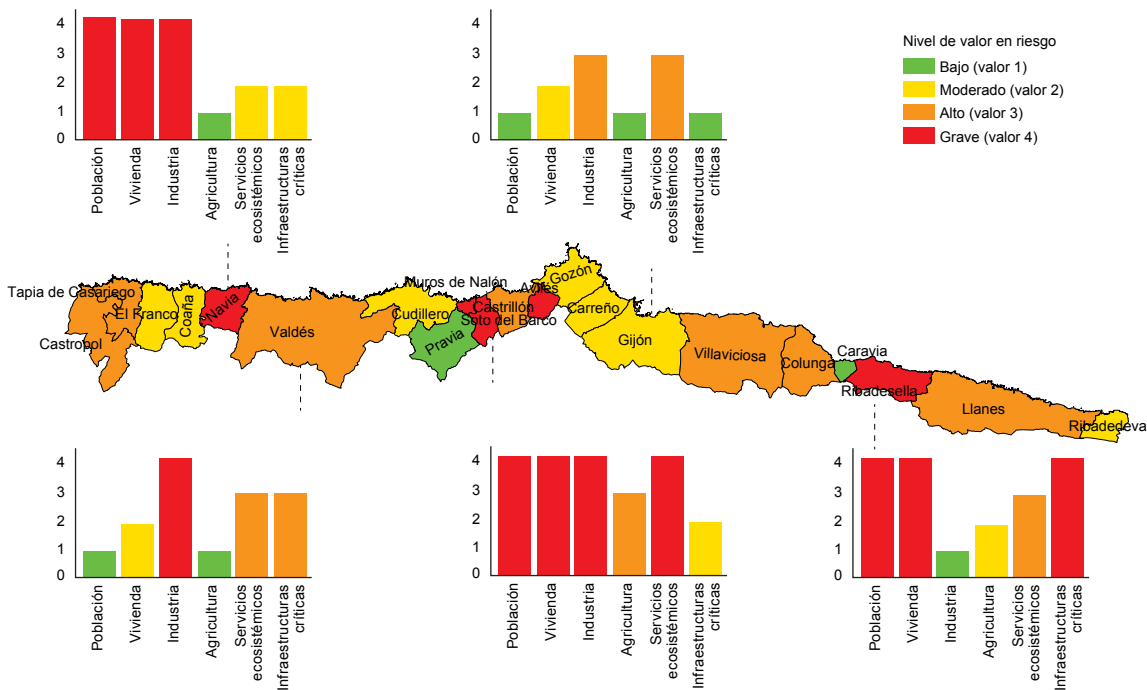
### 6. Agregación de las consecuencias del riesgo

La agregación de las consecuencias multisectoriales del riesgo de inundación permite tener una visión holística de toda la región e identificar aquellas zonas que requieren acción más urgente. Con este fin, se propone una aproximación bayesiana que permite agregar de forma sencilla las consecuencias relativas a cada sector, independientemente de cuál sea su naturaleza. Para ello, es necesario obtener los cambios en las consecuencias para los diferentes escenarios considerados con respecto a la situación actual y reescalarlos del 1 al 4 en función de la magnitud del cambio, dando lugar a un indicador denominado valor en riesgo para una determinada probabilidad. El último paso consiste en asignar un peso a cada sector, lo que permite agregar los valores en riesgo sectoriales en un único índice multilíneal. Para la asignación de pesos es recomendable recurrir a una comisión de actores interesados de diferentes niveles de gobernanza o a criterio experto. En el gráfico 9 se muestra un ejemplo del valor en riesgo sectorial y valor en riesgo sectorial agregado en cada uno de los municipios de la costa del Principado de Asturias.

Si bien esta aproximación no reduce la incertidumbre a la que la sociedad se enfrenta, tiene la flexibilidad suficiente para adaptarse a tantos sectores y escenarios como sea necesario y permite actualizar el valor de las consecuencias del riesgo y de los pesos asignados a cada sector siempre que se quiera, de forma fácil y rápida.

Gráfico 9

Ejemplo de valor en riesgo sectorial agregado para la combinación del evento de 100 años de período de retorno y el aumento del nivel medio del mar (ANMM) correspondiente al escenario de trayectoria de concentración representativa (RCP) 8.5 en la costa del Principado de Asturias



Fuente: Elaboración propia sobre la base de A. Toimil, “A framework for the multi-sectoral assessment of climate change risks in coastal areas”, tesis para optar al grado de doctorado, Santander, Universidad de Cantabria, 2018.



### III. Análisis de la erosión costera

#### A. Modelado del impacto

La erosión inducida por el cambio climático es uno de los impactos más graves a los que se enfrentan los sistemas costeros en todo el mundo. Debido a su complejidad y dinamismo, las playas experimentan cambios en un gran rango de escalas espaciales y temporales y su forma no es fija en el tiempo, sino que está en constante evolución (Stive y otros, 2002; Stive, Ranasinghe y Cowell, 2009; Miller y Dean, 2004). Los procesos erosivos vienen dados por una serie de factores físicos, en particular, por variaciones en el nivel del mar y en la altura y dirección del oleaje, lo que conduce a un desequilibrio sedimentario. El aumento de las inundaciones debidas a eventos extremos, la inundación permanente de las zonas bajas, la aceleración de la erosión costera, la pérdida de humedales y el incremento de la intrusión salina se encuentran entre los principales impactos potenciales del ANMM (Wong y otros, 2014). Hasta el 70% de las playas de arena de todo el mundo están ya en erosión (Bird, 1985; Hinkel y otros, 2013) y muchas de las que siguen en acreción se estabilizarán o incluso retrocederán (Leatherman, Zhang y Douglas, 2000).

El análisis de la migración de la línea de costa puede simplificarse disociando los procesos longitudinales (por ejemplo, Zacharioudaki y Reeve, 2011; Casas-Prat y Sierra, 2012), que son los principales responsables de los cambios a largo plazo, de los ocasionados por procesos transversales (por ejemplo, Callaghan y otros, 2008; Wainwright y otros, 2015), que tienden a producir cambios en escalas temporales mucho menores. Sin embargo, y como excepción a esta generalización, los cambios en la línea de costa producidos por las variaciones en el nivel medio del mar provocan un reajuste del perfil a las nuevas condiciones de nivel y, por tanto, una respuesta transversal de este (Miller y Dean, 2004).

En las últimas décadas se ha prestado mucha atención al estudio de la respuesta de la línea de costa a la amenaza que supone el ANMM. Pese a la controversia que la rodea (Cooper y Pilkey, 2004; Ranasinghe y Stive, 2009), la Regla de Bruun (Bruun, 1962) ha sido ampliamente utilizada por la ingeniería de costas como el único predictor del retroceso de la línea de costa frente al ANMM (Mimura y Nobouka, 1995; Zhang y otros, 2004). Sin embargo, además del ANMM, es necesario considerar otros procesos (Stive, 2004). Por ello, algunos autores preservaron los fundamentos conceptuales de Bruun

(1962), pero trataron de incorporar al balance sedimentario otras fuentes o sumideros. Por ejemplo, Rosati y otros (2013) propusieron una forma modificada que no solo tiene en cuenta el transporte litoral hacia el mar, sino también hacia tierra, dependiendo de las condiciones prevalecientes durante los eventos extremos de marea de meteorológica y de si se produce un exceso o un déficit de arena con respecto al perfil de equilibrio de la playa. Recientemente, Dean y Houston (2016) desarrollaron aún más esta ecuación e incluyeron el efecto de otras fuentes y sumideros, como regeneraciones o dragados, así como gradientes longitudinales debidos al ANMM. Por otro lado, para playas que se encuentran adyacentes a estuarios dominados por el oleaje, Ranasinghe y otros (2013) presentaron un modelo de escala agregada que permite cuantificar la erosión como combinación del efecto Bruun, el efecto relleno de la bahía y las variaciones en el caudal fluvial y en la precipitación derivadas del cambio climático. Otros autores han aplicado métodos más sencillos, que también son consistentes con la Regla de Bruun (por ejemplo, Titus y otros, 1991; Revell y otros, 2011).

El cálculo de la erosión costera puede realizarse con diferentes niveles de complejidad. Esta complejidad varía desde la integral de convolución de Kriebel y Dean (1993), que tiene en cuenta la refracción y el asomeramiento del oleaje y los efectos de la memoria de la playa, hasta modelos de procesos mucho más sofisticados, que incorporan la rotura del oleaje y su dispersión direccional, la fricción del fondo y las variaciones de la superficie libre del mar (Callaghan y Wainwright, 2013). En mitad de todo esto, Cowell y otros (2003) desarrollaron un marco para la agregación de procesos a distintas escalas espaciales, capaz de modelar los cambios en la línea de costa de orden bajo (es decir, de décadas a milenios). Poco después, Miller y Dean (2004) resolvieron numéricamente la forma integral del modelo analítico de Kriebel y Dean (1993) para obtener la respuesta del perfil de playa frente a variaciones del nivel del mar debidas a la combinación de la marea astronómica, la marea meteorológica y la sobreelevación de nivel provocada por la rotura del oleaje. Los autores demostraron que el modelo reproduce la evolución estacional y decadal de la línea de costa satisfactoriamente. Casi una década después, Ranasinghe y otros (2012) presentaron el modelo PCR (*Probabilistic Coastline Recession*), que estima el retroceso de la costa debido al efecto combinado de las tormentas y el ANMM. En ese trabajo, se hizo hincapié en la naturaleza local de la metodología, ya que algunas de las hipótesis asumidas solo son válidas en una playa específica (por ejemplo, un evento de tormenta responde a un evento meteorológico en el que la altura de ola significativa es superior a 3 m y la dirección del oleaje y la altura de la ola se consideran variables independientes). Recientemente, Wainwright y otros (2015) y Jongejan y otros (2016) aplicaron el modelo PCR en la misma playa para la que fue concebido con el objetivo de analizar el impacto del ANMM en la evolución de la línea de costa a largo plazo, aplicando las proyecciones de ANMM del IPCC.

A medida que aumenta el nivel de sofisticación, el coste computacional requerido también aumenta (Callaghan y otros, 2013). Por lo tanto, la escala espacial a la que debe realizarse el análisis es un factor limitante. Se han realizado evaluaciones de la erosión costera a escala global (por ejemplo, Hinkel y otros, 2013; Nicholls y otros, 2011), nacional (por ejemplo, Titus y otros, 1991), regional o subnacional (por ejemplo, Revell y otros, 2011; Casas-Prat y otros, 2016) y local o a escala de playa (por ejemplo, Winwright y otros, 2015; Jongejan y otros, 2016). Aunque la erosión de la costa a largo plazo es ya un problema generalizado a nivel regional e incluso mundial (Bird, 1985; EuroSION, 2004), su estudio está aún lejos de estar tan bien cubierto como el de la inundación. Si bien muchos análisis regionales de riesgo de erosión consideran el transporte originado por el oleaje, pocos tienen en cuenta la recuperación entre tormentas (por ejemplo, Mendoza y Jiménez, 2006; Casas-Prat y otros, 2016) y rara vez incluyen el efecto del ANMM. De hecho, los pocos que combinan el retroceso episódico de la línea de costa con el ANMM o que llegan a cuantificar los daños (por ejemplo, Jiménez y otros, 2012) a esta escala usualmente emplean métodos simples basados en índices.

## B. Evaluación del riesgo

Durante la segunda mitad del siglo pasado, el uso residencial y las actividades industriales y de servicios alrededor de muchas playas de todo el mundo se intensificaron, impulsando el llamado turismo de sol y playa (Aguiló, Alegre y Sard, 2005; Sardá y otros, 2009). Por ello, el hecho de que muchos de estos sistemas estén ya en erosión (Bird, 1985; Hinkel y otros, 2013) plantea serios riesgos para uno de los principales recursos de las regiones costeras, que no solo mantiene la biodiversidad y protege la costa frente a inundaciones, sino que también proporciona servicios recreativos. En 1994, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos admitió que la erosión de la costa constituía ya por aquel entonces una grave amenaza para el turismo y, por lo tanto, para la economía de los Estados Unidos. Aunque hay pruebas de que el cambio climático y el consiguiente ANMM afectarán a la línea de costa (Wong y otros, 2014), hay otros muchos factores que fomentan la erosión de las playas, algo que plantea dificultades con respecto a la elaboración de estrategias de ordenación adecuadas (Phillips y Jones, 2006). Tanto el oleaje local como el nivel del mar contribuyen en gran medida al transporte de sedimentos y, por tanto, a la erosión. En respuesta, si bien algunos sistemas son capaces de retroceder tierra adentro para acomodarse al nuevo nivel del mar, otros experimentarán lo que se denomina estrés costero, que ocurre cuando una costa en erosión se acerca a estructuras rígidas e inmóviles, como malecones o acantilados. Esta presión produce impactos adversos sobre el medio ambiente y la sociedad, tales como la destrucción del hábitat, el aumento de la exposición de bienes y servicios a inundaciones y la pérdida del valor recreativo de las playas. A la luz de esta amenaza sin precedentes, la investigación sobre los riesgos del cambio climático y la adaptación en las zonas costeras en relación con el turismo y la recreación, un campo relativamente inexplorado, está adquiriendo cada vez más importancia (Schliephack y Dickinson, 2017). Sin embargo, las limitaciones actuales de las proyecciones climáticas y socioeconómicas no dejan más remedio que tomar decisiones en el contexto de la incertidumbre. Por esta razón, existe una necesidad creciente de alejarse de los enfoques deterministas, inciertos y generalizados (por ejemplo, Bruun, 1962) y avanzar hacia marcos probabilísticos que permitan la planificación y gestión más eficaz de las zonas costeras. Ante esta situación, es importante trabajar para reducir la brecha entre la comunidad científica y las partes interesadas pertinentes, como los turistas y los usuarios locales, así como los responsables de la toma de decisiones, que a menudo no solo desconocen los procesos físicos, sino también el alcance y las consecuencias del cambio climático.

Entre los aspectos más comunes de la gestión de la costa se encuentra el uso de las playas y la gestión de su sedimento (Ariza, Jiménez y Sardá, 2008), aspectos que requieren comprender las preferencias, percepciones y valoraciones económicas de los usuarios basadas en sus propias experiencias (Blakemore y Williams, 2008). Las técnicas de valoración de activos naturales más utilizadas incluyen: i) preferencias declaradas, como la valoración contingente (cuestionarios) y los experimentos de selección (experimentos simulados), que difieren en la forma en que se presentan los atributos y en la estructura de la pregunta acerca de la voluntad de pago por parte de los usuarios (Birdir y otros, 2013); ii) preferencias reveladas, como el método del coste de viaje, que contabiliza los costes de acceso a los activos (Loomis y Santiago, 2013), y el método de precios hedónicos, que Parsons y Powell (2001) utilizaron para estimar el valor de la pérdida de arena con la información sobre el precio de la vivienda en ese momento, y iii) métodos de mercado, como, por ejemplo, los basados en costes (costes evitados o defensivos) y la función de producción, en los que se supone que las playas son activos ambientales que contribuyen al suministro de bienes o servicios sociales. Sin embargo, aunque la literatura es bastante diversa en términos de evaluaciones de la calidad de las playas (por ejemplo, Morgan, 1999; Roca, Villares y Ortego, 2009), hasta ahora se no se ha prestado mucha atención a la valoración cuantitativa de la recreación. Los conceptos de turismo de sol y playa y recreación tienen una relación de causa y efecto. Durante casi dos décadas, Houston (2013) centró gran parte de su investigación en destacar la importancia de las playas para la economía de los Estados Unidos. Señaló que, si las playas de California no estuvieran disponibles para la recreación,

los usuarios gastarían aproximadamente 2.400 millones de dólares fuera de los Estados Unidos (King y Symes, 2003), lo que pone de manifiesto las graves implicaciones de considerar la recreación poco prioritaria. Más recientemente, Alexandrakis, Manasakis y Kampanis (2015) capitalizaron el valor de la playa erosionada en los ingresos de las empresas turísticas a través de modelos de precios hedónicos, en los que el valor de la playa estaba determinado por su ancho y los negocios turísticos ubicados en los alrededores. King, McGregor y Whittet (2016) estimaron los cambios en el valor económico de la recreación de playa a través de un enfoque de transferencia de beneficios que utilizaba información sobre el clima, la calidad del agua y las instalaciones y servicios de la playa, entre otros.

Con el objetivo de asegurar una recreación sostenible y evitar pérdidas futuras masivas del valor recreativo de las playas, las predicciones de los cambios en la línea de costa deben ser hoy más fiables que nunca (Ranasinghe, Callaghan y Stive, 2012). Esto implica que la práctica común y generalizada de adoptar un único valor del retroceso de la costa debido a un único valor de ANMM resulta inadecuada para los marcos de gestión de riesgos emergentes, que exigen estimaciones probabilísticas del efecto combinado de una serie de factores climáticos y no climáticos y sus incertidumbres asociadas (por ejemplo, expresadas en términos de niveles de confianza) (Ranasinghe, Callaghan y Stive, 2012). Lo que ocurre es que, si bien el análisis de la erosión de playas está menos avanzado que el de inundación, las evaluaciones de riesgos y consecuencias son aún mucho menores. Wainwright y otros (2015) utilizaron un modelo económico para determinar la ubicación óptima de la línea de costa para su regeneración, teniendo en cuenta los daños potenciales y el coste de la inversión que supone la realimentación. Siguiendo una aproximación similar, Jongejan y otros (2016) combinaron las funciones de densidad de probabilidad de los extremos de retroceso anual de la línea de costa con datos de valor de la propiedad para obtener estimaciones de riesgo de erosión, centrándose también en el establecimiento de líneas de retroceso óptimas. Los dos estudios arrojaron estimaciones probabilísticas del retroceso de la línea de costa impulsado por la combinación de la erosión debida a eventos extremos y al ANMM. No obstante, aunque en ambos casos la metodología se aplicó solo a una única playa, la gestión eficiente de la costa requiere que el alcance del análisis se extienda a toda una región.

### **C. Propuesta metodológica para un análisis sectorial del riesgo de erosión costera a escala regional y con alta resolución**

Tras identificar vacíos en el conocimiento y áreas potenciales de mejora en las metodologías existentes, se propone una metodología para evaluar el riesgo sectorial de la erosión inducida por el cambio climático a escala regional, es decir, en un número elevado de playas. Esta metodología responde al marco integrado de análisis de riesgos descrito en la sección II.E.2 de este documento y representado en forma de diagrama de flujo (diagrama 7). En lo que respecta al modelado del impacto, se combina información climática de alta resolución espacio-temporal (bases de datos de reanálisis y proyecciones), la aplicación de un modelo de evolución de la línea de costa que permite tener en cuenta el tiempo entre tormentas y la agrupación de tormentas, la estimación probabilística de los cambios en la línea de costa inducidos por efectos de corto y largo plazo, la inclusión de los efectos que los estuarios pueden llegar a tener en el retroceso de las playas adyacentes y la cuantificación de la incertidumbre. El riesgo de erosión se evalúa sobre el servicio recreativo que ofrecen las playas y, para ello, se opta por la aplicación de un método basado en la función de producción. De este modo, los resultados obtenidos tras el modelado se combinan con criterios ambientales y sociales (exposición) y, finalmente, se les aplica una serie de factores correctores que tienen en cuenta las características, la calidad y los servicios específicos de cada playa (vulnerabilidad), dando lugar al riesgo de pérdida de valor recreativo de las playas de estudio. Como puede observarse en el cuadro 4, la metodología propuesta supone un avance importante con respecto a otros análisis existentes.



**Cuadro 4**  
**Principales elementos de la metodología desarrollada y su comparación con la literatura existente**

	Metodología propuesta	Ranasinghe y otros (2012)	Ranasinghe y otros (2013)	Alexandrakis y otros (2014, 2015)	Sierra y Casas-Prat (2014)	Jongejan y otros (2016)	Casas-Prat y otros (2016)
Escala	Regional (57 playas)	Local	Regional (5 playas)	Regional (38 perfiles)	-	Local	Regional (5 playas)
Dinámicas marinas	Oleaje y nivel del mar (>60 años, alta resolución) Proyecciones locales de oleaje (40 GCM) y ANMM	ANMM	ANMM	Oleaje (único valor) y ANMM	Oleaje (único valor) Proyecciones globales de oleaje (2 RCM-GCM)	ANMM	Oleaje (30 años) Proyecciones regionales de oleaje (5 RCM-GCM)
Acoplamiento de escalas temporales	Oleaje, MM, MA y ANMM (+ respuesta morfológica)	Tormenta de diseño y ANMM	ANMM y respuesta morfológica	Oleaje y ANMM	-	Tormenta de diseño y ANMM	-
Efectos en estuarios	Relleno de la bahía y bajo exterior	-	Relleno de la bahía, cambios en el caudal de sólidos y en la precipitación	-	-	-	-
Tipo de análisis	Probabilístico	Probabilístico	Determinista	Determinista	Determinista	Probabilístico	Determinista
Incertidumbre	Oleaje, MM y ANMM	Tormentas	-	-	-	Tormentas	-
Análisis económico	Riesgo de pérdida de valor recreativo	-	-	Consecuencias en ingresos de turismo	-	Riesgo según el valor de las propiedades	-

Fuente: Elaboración propia.

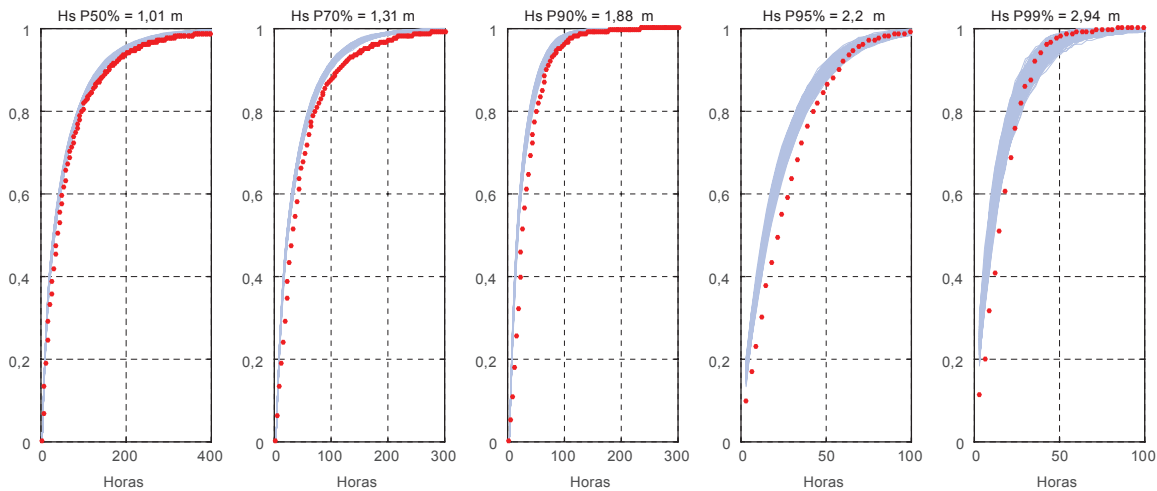
Nota: GCM: modelos de circulación general; RCM: modelos de circulación regional; ANMM: aumento del nivel medio del mar; MM: marea meteorológica; MA: marea astronómica.

A continuación, se describen los aspectos más significativos de la metodología propuesta.

## 1. Peligrosidad

Dada la naturaleza del impacto de erosión, la peligrosidad se caracteriza a través de las dinámicas marinas transferidas a pie de playa. Aunque las más significativas son el oleaje y el ANMM, los efectos de la marea meteorológica y la marea astronómica no pueden despreciarse. Análogamente al caso del estudio de la inundación, es importante utilizar series de reanálisis de oleaje y marea meteorológica largas y de alta resolución espacio-temporal (O (500-1000 m)), así como proyecciones locales con el mayor número posible de GCM. Por otro lado, y debido a los requerimientos de los nuevos marcos de gestión de riesgos, una cuantificación robusta de la incertidumbre solo es posible si se realiza un análisis probabilístico. Por ello, se propone la aplicación de un modelo VAR (*vector autoregressive*) para generar 1000 series sintéticas multivariadas de altura de ola significativa y marea meteorológica (por ejemplo, Solari y van Gelder, 2012) de la actualidad a 2100 para cada playa de estudio. Este tipo de modelos trata de explicar la estructura de la serie temporal de forma que el valor de las variables en un instante es función lineal de los valores inmediatamente anteriores. Un aspecto esencial aquí es el análisis de las persistencias, ya que la naturaleza del modelo de equilibrio hace que gran parte de las erosiones (o acreciones) se alcancen para condiciones que perduran durante largos períodos de tiempo (véase el gráfico 10).

**Gráfico 10**  
**Ejemplo de persistencia de la altura de ola significativa (Hs) sobre los umbrales correspondientes a los percentiles 50, 70, 90, 95 y 99 de la distribución**  
*(Función de distribución acumulada)*



Fuente: Elaboración propia.

Nota: las líneas azules muestran los datos obtenidos de 1000 series simuladas, y los puntos rojos, los datos históricos.

Para realizar un análisis probabilístico completo, es necesario incluir también la incertidumbre del ANMM. Para ello no basta solo con trabajar con el valor medio del ANMM correspondiente a los escenarios considerados, sino que también hay que tener en cuenta la desviación estándar.

## 2. Modelado probabilístico del impacto

De acuerdo con lo anterior, es posible modelar 3000 evoluciones de la línea de costa a lo largo del siglo XXI en cada playa de estudio. Para tal fin, es necesario emplear un modelo eficiente cuyo coste computacional sea bajo pero que a la vez permita tener en cuenta todas aquellas dinámicas generadoras de la erosión costera, es decir, el oleaje, la marea meteorológica, la marea astronómica y el ANMM. Además, en el caso de playas adyacentes a estuarios, se debe incluir el efecto que estos sistemas pueden tener en su retroceso a largo plazo.

La metodología propuesta contempla el empleo de un modelo de evolución de la línea de costa basado en la observación general de que la línea de costa tiende exponencialmente a alcanzar una posición de equilibrio cuando está sujeta a forzamientos constantes, de acuerdo con la siguiente ecuación diferencial de gobierno:

$$\frac{dy(t)}{dt} = k (y_{eq}(t) - y(t)) \quad (2)$$

donde  $y(t)$  es la posición de la línea de costa en el tiempo  $t$ ,  $y_{eq}(t)$  es la posición de equilibrio determinada por el forzamiento en el tiempo  $t$  y  $k$  es la constante que gobierna la tasa a la cual la línea de costa se acerca al equilibrio.

Miller y Dean (2004) usaron diferencias finitas para reescribir la ecuación (2) y obtener así la respuesta del perfil de playa frente a variaciones del nivel del mar local (es decir, remonte del oleaje, marea meteorológica y marea astronómica):

$$y^{n+1} = \frac{y^n + Q[(y_{eq}^{n+1} + y_{eq}^n) - y^n]}{1 + Q}, \quad Q = \frac{k\Delta t}{2} \quad (3)$$

donde  $n$  es el paso de tiempo de la simulación y  $\Delta t$  es el paso de tiempo de las series temporales (por ejemplo, 1 hora).

La posición de equilibrio de la línea de costa  $y_{eq}$  está gobernada en cada instante por el cambio en la línea de costa de equilibrio  $\Delta y_{eq}$  de acuerdo con:

$$y_{eq}(t) = \Delta y_0 + \Delta y_{eq}(t) \quad (4)$$

donde  $\Delta y_0$  es un parámetro empírico y  $\Delta y_{eq}$  responde a los movimientos de erosión o acreción de la línea de costa con respecto al equilibrio.

Asumiendo la teoría del perfil de equilibrio y una conservación de volumen similar a la de Bruun (1962), Miller y Dean (2004) propusieron una ecuación empírica en la que los cambios en la línea de costa de equilibrio ( $\Delta y_{eq}$ ) se expresan como combinación del remonte del oleaje y de la marea meteorológica. No obstante, y dada la importancia de la marea meteorológica en algunas playas (es decir, playas macromareales), esta se ha incorporado como término adicional. A este respecto, cabe puntualizar que, lejos de inducir una tendencia erosiva del perfil, el efecto de la marea astronómica acentúa los procesos erosivos y lleva a acreciones más rápidas, mejorando así el comportamiento de las playas en las que esta dinámica es dominante. Por lo tanto,  $\Delta y_{eq}$  se puede expresar como:

$$\Delta y_{eq}(t) = -W^*(t) \left( \frac{0,106 H_b(t) + MM(t) + MA(t)}{B + H_b(t)} \right) \quad (5)$$

donde  $W^*$  es el ancho del perfil activo,  $H_b$  es la altura de ola de rotura y  $B$  es la altura de la berma.

Un aspecto que discutir aquí es cómo determinar la tasa a la que la línea de costa migra hacia la posición de equilibrio (ecuación 3) y que adopta valores distintos si el proceso es de erosión o de acreción. Si bien las playas se erosionan y acrecen de forma distinta en cada tormenta, Miller y Dean (2004), tras explorar distintas opciones (es decir,  $k$  constante,  $k$  proporcional a  $H_b^2$ ,  $k$  proporcional a  $H_b^3$ , entre otras), determinaron que, dado que ninguna forma funcionaba mejor que otra y hasta que no se desarrollasen parámetros más adecuados, lo mejor era mantener  $k$  en su forma más simple, es decir, constante. Para determinar su valor, es necesario disponer de datos de campo y ajustar la serie simulada a las observaciones. Se recomienda, al menos, disponer de información de varios eventos y utilizar un valor medio.

No obstante, como ya se ha comentado anteriormente en el documento, cualquier cambio a largo plazo en la línea de costa viene dado por la combinación de efectos de corto plazo (a saber, oleaje y nivel del mar) y del ANMM. Aun así, en la práctica, ni la interacción de estos procesos ni el acoplamiento de escalas están del todo resueltos en la literatura. La metodología propuesta opta por combinar el modelo de Miller y Dean (2004) ligeramente modificado para incluir la marea astronómica con lo que se ha denominado “efecto Bruun”, y que no es otra cosa que el movimiento hacia arriba y hacia tierra del perfil (Bruun, 1962), pero dependiente del tiempo. Las teorías en las que se basa el modelo de Miller y Dean (2004) (es decir, perfil de equilibrio y conservación de volumen de Bruun), junto con las evidencias en la literatura que demuestran que el modelo es capaz de reproducir satisfactoriamente el efecto del aumento de nivel (Miller y Dean, 2004) refuerzan esta estrategia. Sobre la base de todo lo anterior, la ecuación (4) puede reescribirse como:

$$y_{eq}(t) = \Delta y_0 + \Delta y_{eq}(t) + R_{Bruun}(t) \quad (6)$$

donde  $R_{Bruun}$  representa el movimiento hacia arriba y hacia tierra del perfil debido al ANMM y se obtiene como:

$$R_{Bruun} = -W^* \frac{ANMM}{B + h^*} \quad (7)$$

donde  $h^*$  es la profundidad de cierre del perfil.

Finalmente, en el caso de playas situadas junto a desembocaduras, a la evolución de la línea de costa ocasionada por el transporte transversal  $\left(\frac{dy(t)}{dt}\right)$  habría que añadirle las fuentes o sumideros longitudinales derivados de los efectos que los estuarios pueden tener sobre ellos:

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{dy(t)}{dt} - R_{Estuario}(t) \quad (8)$$

donde  $\left(\frac{dy(t)}{dt}\right)$  representa la evolución de la línea de costa futura en las playas adyacentes a estuarios y  $R_{Estuario}$  es el retroceso inducido por los estuarios adyacentes.

Volviendo al ejemplo de sistemas macromareales,  $R_{Estuario}$  responde al retroceso de la línea de costa debido al efecto del relleno de la bahía y al efecto del bajo exterior:

$$R_{Estuario}(t) = R_{Relleno\ de\ la\ bahía}(t) + R_{Bajo\ exterior}(t) \quad (9)$$

donde el  $R_{Relleno\ de\ la\ bahía}$  debido al incremento en el espacio de acomodación de la bahía como consecuencia del aumento del prisma de marea en respuesta al ANMM, se expresa como:

$$R_{Relleno\ de\ la\ bahía} = -\frac{ANMM A_b F}{L(B + h^*)} \quad (10)$$

donde es el área  $A_b$  de la bahía y  $F$  es un factor que tiene en cuenta la proporción de arena en el fondo y donde el  $R_{Bajo\ exterior}$  que responde al déficit de sedimento que el ANMM producirá en el bajo exterior de los estuarios, se puede calcular de la siguiente forma:

$$R_{Bajo\ exterior} = -\frac{\Delta V_{eq}}{L(B + h^*)} \quad (11)$$

donde  $\Delta V_{eq}$  representa el cambio de volumen del bajo exterior y se obtiene a partir de formulaciones de estado de equilibrio.

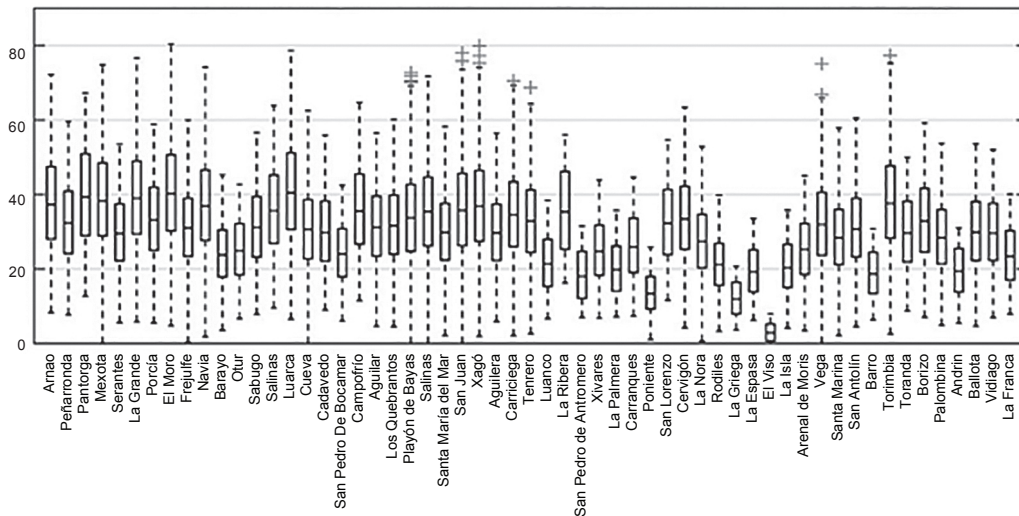
Es importante señalar que el método propuesto para determinar el retroceso de la línea de costa debido al efecto de estuarios en sistemas macromareales asume algunas hipótesis simplificadoras: i) el estado actual de los estuarios es cercano al equilibrio dinámico; ii) el volumen de arena requerido para satisfacer el relleno de la bahía y el déficit de arena del bajo exterior provendrá de la playa adyacente;

iii) el sistema volverá al equilibrio dinámico; iv) la proporción de arena en el fondo se mantendrá constante, y v) el área de la bahía permanecerá inalterada. Esto último solo es aceptable para estuarios con las márgenes confinadas. No obstante, obviar los efectos que estos sistemas pueden ocasionar en la evolución a largo plazo de las playas adyacentes podría llegar a subestimar su retroceso potencial total. Por ejemplo, en Toimil y otros (2017b), se toman como ejemplo 5 sistemas playa-estuario de la costa del Principado de Asturias y se demuestra que el efecto Bruun representa entre un 46% y un 91% de la erosión potencial y la contribución del efecto relleno de la bahía oscila entre un 8% y un 46%, y que el efecto del bajo exterior cumple un papel mucho menor debido al pequeño tamaño de los bajos exteriores de estos sistemas.

Ranasinghe y otros (2013) proponen una alternativa para playas adyacentes a estuarios dominados por el oleaje.

Como ejemplo de resultados, el gráfico 11 muestra la variabilidad espacial del percentil del 75%, la mediana y el percentil del 25% del retroceso a fin del siglo XXI de 57 playas del Principado de Asturias. Ese retroceso a fin de siglo, denotado como R2100, se ha calculado en cada playa sustrayendo la posición media inicial de los primeros 5 años de la posición media final de los últimos 5 años.

**Gráfico 11**  
**Ejemplo de distribución espacial del percentil del 75%, la mediana y el percentil del 25%**  
**de todo el rango de R2100<sup>a</sup> para cada playa del Principado de Asturias<sup>b</sup> y según la trayectoria**  
**de concentración representativa (RCP) 8.5**  
*(En metros)*



Fuente: Elaboración propia sobre la base de A. Toimil, “A framework for the multi-sectoral assessment of climate change risks in coastal areas”, tesis para optar al grado de doctorado, Santander, Universidad de Cantabria, 2018.

Nota: El percentil del 75% es la marca superior de la caja, la mediana es la marca central y el percentil del 25% es la marca inferior de la caja.

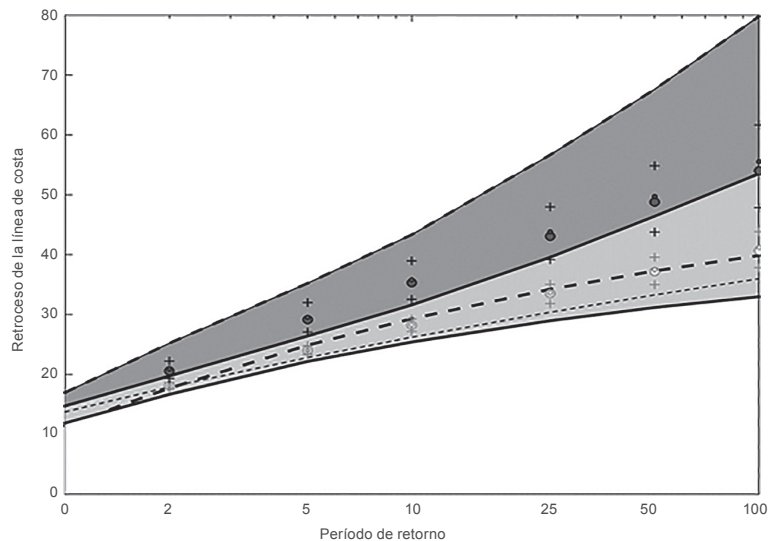
<sup>a</sup> Retroceso a fin del siglo XXI.

<sup>b</sup> Las playas se enumeran de oeste a este.

El hecho de trabajar con miles de series largas de evolución de la línea de costa permite obtener la función de distribución de probabilidad del retroceso en cada playa de estudio, como se muestra en el gráfico 12 para la playa de San Lorenzo, una de las más emblemáticas del Principado de Asturias. En ese caso de ejemplo, la banda sombreada oscura (entre líneas gruesas punteadas) representa los intervalos de confianza del 95% del ajuste GEV realizado a las 3000 series de evolución de la línea de

costa simuladas de 2010 a 2100; la banda sombreada clara (entre líneas gruesas continuas) representa los intervalos de confianza del 95% del ajuste GEV realizado a las 1000 series de evolución de la línea de costa simuladas de 2010 a 2100 sin ANMM; la línea fina punteada representa el ajuste GEV realizado a las series históricas de evolución de la línea de costa de 1967 a 2014; los círculos negros y grises grandes son las medianas; los círculos negros y grises pequeños son los valores medios, y las cruces negras y grises son las desviaciones estándar.

**Gráfico 12**  
**Ejemplo de función de distribución de la probabilidad de erosión en la playa de San Lorenzo**  
**(Principado de Asturias) para la trayectoria de concentración representativa (RCP) 8.5**  
*(En metros y años)*



Fuente: Elaboración propia sobre la base de A. Toimil, “A framework for the multi-sectoral assessment of climate change risks in coastal areas”, tesis para optar al grado de doctorado, Santander, Universidad de Cantabria, 2018.

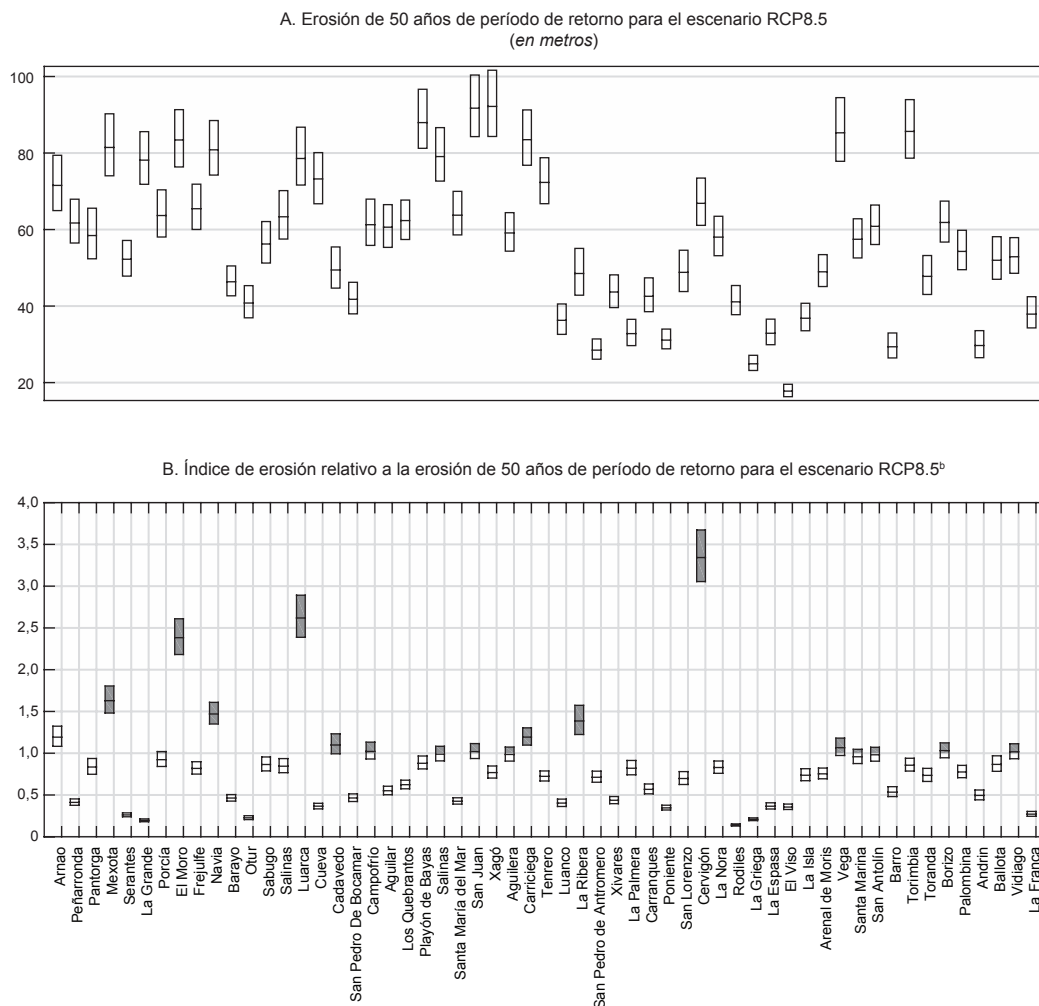
Nota: La banda sombreada oscura representa los intervalos de confianza del 95% del ajuste GEV de las 3000 series de evolución de la línea de costa simuladas de 2010 a 2100; la banda sombreada clara representa los intervalos de confianza del 95% del ajuste GEV realizado a las 1000 series de evolución de la línea de costa simuladas de 2010 a 2100 sin aumento del nivel medio del mar; la línea fina punteada representa el ajuste GEV de las series históricas de evolución de la línea de costa de 1967 a 2014; los círculos negros y grises grandes son las medianas; los círculos negros y grises pequeños son las medias, y las cruces negras y grises son las desviaciones estándar.

Finalmente, el gráfico 13 muestra el ejemplo de la distribución espacial del percentil del 75%, la mediana y el percentil del 25% del evento de erosión de 50 años del período de retorno (panel superior) e índice de erosión asociado (panel inferior, donde el color gris indica la desaparición de la playa) para cada playa del Principado de Asturias (de O a E), a fin de siglo. El índice de erosión se calcula como el cociente entre un retroceso (por ejemplo, correspondiente a un percentil de la distribución) y el ancho medio actual de la playa, proporcionando información acerca del nivel de criticidad de ese retroceso.

De este modo, es posible estimar los cuantiles de retroceso asociados a diferentes períodos de retorno y cuantificar las pérdidas asociadas a eventos extremos dentro del marco de la ordenación territorial y la gestión del riesgo. Es importante remarcar que, mientras el indicador R2100 y los cambios anuales en la línea de costa son indicativos de la variabilidad interanual debida al oleaje y al nivel del mar, los retrocesos asociados a períodos de retorno elevados corresponden a erosiones excepcionales o poco frecuentes que muchas veces son causantes de importantes daños.



**Gráfico 13**  
**Distribución espacial del percentil del 75%, la mediana y el percentil del 25% del evento de erosión de 50 años de período de retorno, e índice de erosión asociado para cada playa del Principado de Asturias<sup>a</sup> a fin del siglo XXI, según la trayectoria de concentración representativa (RCP) 8.5**



Fuente: Elaboración propia sobre la base de A. Toimil, “A framework for the multi-sectoral assessment of climate change risks in coastal areas”, tesis para optar al grado de doctorado, Santander, Universidad de Cantabria, 2018.

Nota: El percentil del 75% es la marca superior de la caja, la mediana es la marca central y el percentil del 25% es la marca inferior de la caja.

<sup>a</sup> Las playas se enumeran de oeste a este.

<sup>b</sup> El color gris indica la desaparición de la playa.

### 3. Exposición y vulnerabilidad

El paradigma desarrollado para valorar el uso recreativo de las playas consta de cuatro pasos. En primer lugar, se estima el área requerida por un usuario para estar cómodamente en la playa. A continuación, se calcula el número medio de horas al año que las playas de estudio prestan servicios recreativos a sus usuarios. Para ello, es necesario definir dos estaciones, la recreativa y la no recreativa, y utilizar datos asociados a las condiciones geográficas (por ejemplo, el número de días y horas potenciales en los que poder usar la playa como activo recreativo) e información acerca del comportamiento de los usuarios (por ejemplo, cuándo van a la playa). En tercer lugar, se calcula el valor del tiempo de ocio. Entre las diversas aproximaciones existentes, se propone la que estima el valor de una hora de tiempo recreativo como una

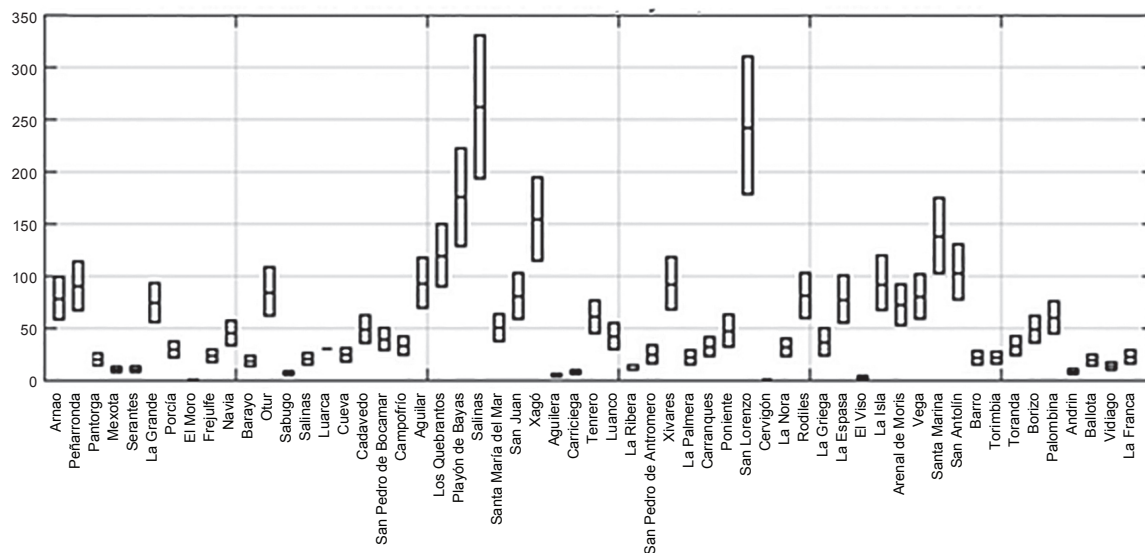
proporción del valor de una hora de trabajo. Finalmente, se realiza una valoración económica y contable del uso recreativo de las playas. Esa valoración está afectada por una serie de factores correctores que tienen en cuenta la tipología de la playa (por ejemplo, urbana, semiurbana o aislada), su calidad (por ejemplo, en términos de agua, arena, servicios y seguridad) y sus accesos, esto último debido a que los usuarios tienden a situarse en un radio aproximado de 300 m desde la entrada a la playa (Jiménez y otros, 2007). Así, playas urbanas con excelente calidad de agua y arena, servicios y accesos tendrán un valor superior a playas con peores características.

Mientras que los pasos de 1 a 3 se refieren a la caracterización de la exposición, el paso 4 incorpora el componente de vulnerabilidad y diseña el modelo de daño para, en última instancia, obtener el riesgo.

#### 4. Estimación del riesgo

Una vez obtenida la valoración contable de las playas de estudio, esta se combina con los retrocesos de la línea de costa, dando lugar al riesgo de pérdida de valor recreativo de las playas por efecto del cambio climático. Como ejemplo de los resultados que pueden obtenerse, el gráfico 14 muestra la pérdida acumulada de valor recreativo de las 57 playas del Principado de Asturias a fin de siglo. Estos resultados tienen en cuenta todo el rango de valores de R2100 en cada playa, donde la marca superior representa el percentil del 75%, la marca central la mediana y la marca inferior el percentil del 25%.

**Gráfico 14**  
**Distribución espacial de la pérdida acumulada o total de valor recreativo correspondiente al percentil del 75%, la mediana y el percentil del 25% de todo el rango de R2100<sup>a</sup> para cada playa del Principado de Asturias<sup>b</sup> y según la trayectoria de concentración representativa (RCP) 8.5**  
*(En millones de euros)*



Fuente: Elaboración propia sobre la base de A. Toimil, “A framework for the multi-sectoral assessment of climate change risks in coastal areas”, tesis para optar al grado de doctorado, Santander, Universidad de Cantabria, 2018.

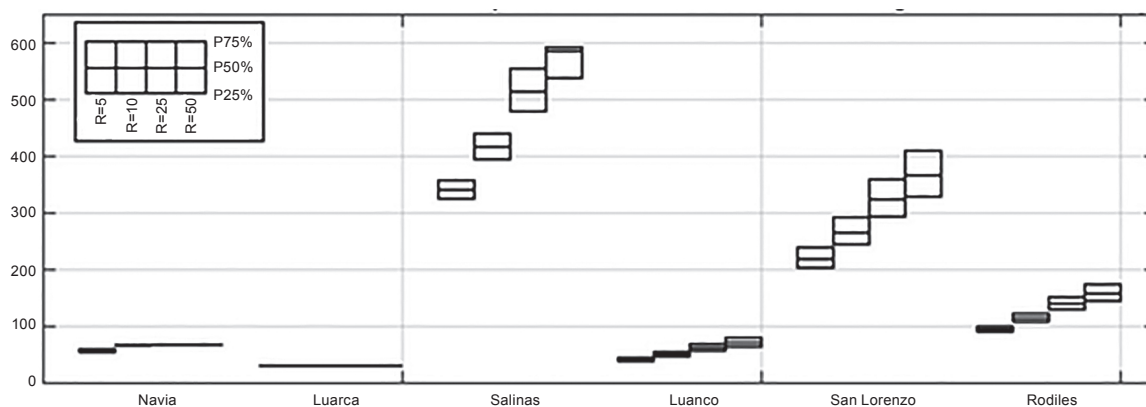
Nota: El percentil del 75% es la marca superior de la caja, la mediana es la marca central y el percentil del 25% es la marca inferior de la caja.

<sup>a</sup> Retroceso a fin del siglo XXI.

<sup>b</sup> Las playas se enumeran de oeste a este.

Otro ejemplo es el correspondiente a las pérdidas de valor recreativo debidas a eventos extremos de erosión. El gráfico 15 muestra, en 6 de las playas del Principado de Asturias, las pérdidas asociadas al percentil del 75%, a la mediana y al percentil del 25% de los retrocesos de 5, 10, 25 y 50 años de período de retorno, los más utilizados para propósitos de gestión y planificación. Es importante señalar que estos períodos de retorno no corresponden a las dinámicas generadoras de la erosión (peligrosidad) sino al propio impacto, es decir, se trata de eventos extremos de retroceso de la línea de costa. Al contrario de lo que ocurre con el ANMM, las playas pueden recuperarse completamente tras una tormenta y, en consecuencia, recuperar el valor recreativo perdido. No obstante, también puede pasar que el efecto acumulado de varias tormentas consecutivas impida que algunas playas se repongan.

**Gráfico 15**  
**Pérdida de valor recreativo en las playas de Navia, Otur, Luarca, Salinas, San Lorenzo y Rodiles (Principado de Asturias) correspondiente al percentil del 75%, la mediana y el percentil del 25% de retroceso de 5, 10, 25 y 50 años de período de retorno, a fin del siglo XXI y según la trayectoria de concentración representativa (RCP) 8.5**  
*(En millones de euros)*

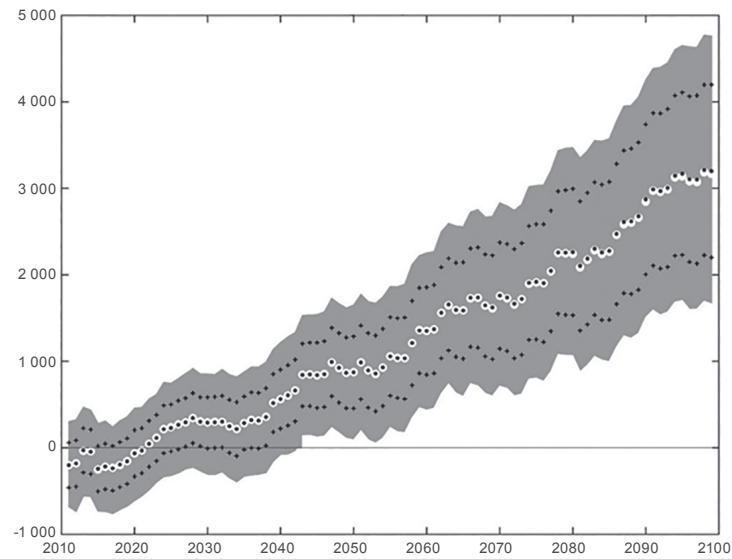


Fuente: Elaboración propia sobre la base de A. Toimil, "A framework for the multi-sectoral assessment of climate change risks in coastal areas", tesis para optar al grado de doctorado, Santander, Universidad de Cantabria, 2018.

Nota: El percentil del 75% es la marca superior de la caja, la mediana es la marca central y el percentil del 25% es la marca inferior de la caja.

Finalmente, el gráfico 16 muestra un ejemplo de daño total esperado, que se obtiene de acumular el daño anual esperado a lo largo de los años. Los resultados corresponden al daño total esperado sobre el valor recreativo del conjunto de 57 playas del Principado de Asturias a lo largo del siglo XXI. La banda sombreada oscura representa los intervalos de confianza del 95%; los círculos blancos son las medianas; los puntos negros son los valores medios, y las cruces negras corresponden a las desviaciones estándar.

**Gráfico 16**  
**Daño total o acumulado esperado sobre el valor recreativo de las playas del Principado de Asturias,**  
**según la trayectoria de concentración representativa (RCP) 8.5, entre 2010 y 2100**  
*(En millones de euros)*



**Fuente:** Elaboración propia sobre la base de A. Toimil, “A framework for the multi-sectoral assessment of climate change risks in coastal areas”, tesis para optar al grado de doctorado, Santander, Universidad de Cantabria, 2018.

**Nota:** La banda sombreada oscura representa los intervalos de confianza del 95%; los círculos blancos son las medianas; los puntos negros son los valores medios, y las cruces negras corresponden a las desviaciones estándar.

## Bibliografía

- Adger, W. N. (2006), "Vulnerability", *Global Environmental Change*, vol. 16.
- Aguiló, E., J. Alegre y M. Sard (2005), "The persistence of the sun and sand tourism model", *Tourism Management*, vol. 26.
- Alexandrakis, G. y S.E. Poulos (2014), "An holistic approach to beach erosion vulnerability assessment", *Scientific Reports*.
- Alexandrakis G., C. Manasakis y N.A. Kampanis (2015), "Valuating the effects of beach erosion to tourism revenue. A management perspective", *Ocean & Coastal Management*, vol. 111.
- Ariza, E., J.A. Jiménez y R. Sardá (2008), "A critical assessment of beach management on the Catalan Coast", *Ocean & Coastal Management*, vol. 51.
- Arns, A. y otros (2017), "Sea-level rise induced amplification of coastal protection design heights", *Scientific Reports*, vol. 7, N° 40171.
- Bates, P.D. y A.P.J. De Roo (2000), "A simple raster-based model for flood inundation simulation", *Journal of Hydrology*, vol. 236.
- Bates, P.D., M.S. Horritt y T.J. Fewtrell (2010), "A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling", *Journal of Hydrology*, vol. 387, N° 12.
- Batstone, C., y otros (2013), "A UK best-practice approach for extreme sea-level analysis along complex topographic coastlines", *Ocean Engineering*, vol. 71, N° 1.
- Bird, E.C.F. (1985), *Coast Changes*, Nueva York, Wiley&Sons.
- Birdir, S. y otros (2013), "Willingness to pay as an economic instrument for coastal tourism management: Cases from Mersin, Turkey", *Tourism Management*, vol. 36.
- Blakemore, F. y A. Williams (2008), "British tourists' valuation of a Turkish beach using contingent valuation and travel cost methods", *Journal of Coastal Research*, vol. 24.
- Bruun, P. (1962), "Sea level rise as a cause of shore erosion", *Journal of the Waterways and Harbors Division*, vol. 88.
- Callaghan, D. P. y D. Wainwright (2013), "The impact of various methods of wave transfers from deep water to nearshore when determining extreme beach erosion", *Coastal Engineering*, vol. 74.
- Callaghan, D.P., R. Ranasinghe y D. Roelvink (2013), "Probabilistic estimation of storm erosion using analytical, semi-empirical, and process based erosion models", *Coastal Engineering*, vol. 82.
- Callaghan, D.P. y otros (2008), "Process-determined coastal erosion hazards", *Proceedings of the 31st International Conference on Coastal Engineering*, World Scientific.
- Camus, P. y otros (2017), "Statistical wave climate projections for coastal impact assessments", *Earth's Future*.
- \_\_\_\_\_(2014), "A weather-type statistical downscaling framework for ocean wave climate", *Journal of Geophysical Research: Oceans*.

- \_\_\_\_\_ (2013), "High resolution Downscaled Ocean Waves (DOW) reanalysis in coastal areas", *Coastal Engineering*, vol. 72.
- Casas-Prat, M. y J.P. Sierra (2012), "Trend analysis of wave direction and associated impacts on the Catalan coast", *Climatic Change*, vol. 115.
- Casas-Prat, M. y otros (2016), "Future wave-driven coastal sediment transport along the Catalan coast (NW Mediterranean)", *Regional Environmental Change*, vol.16.
- Cooper, J.A.G. y O.H. Pilkey (2004), "Sea level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun rule", *Global and Planetary Change*, vol. 43.
- Cowell, P.J. y otros (2003), "The coastal-tract (part1): a conceptual approach to aggregated modeling of low-order coastal change", *Journal of Coastal Research*, vol.19.
- Dawson, R.J. y otros (2009), "Integrated analysis of risks of coastal flooding and cliff erosion under scenarios of long term change", *Climatic Change*, vol. 95.
- Dean, R.G. y J.R. Houston (2016), "Determining shoreline response to sea level rise", *Coastal Engineering*, vol.114.
- De Moel, H., y otros (2015), "Flood risk assessments at different spatial scales", *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 20
- Egbert, G.D., A.F. Bennett y M.G.G. Foreman (1994), "TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model", *Journal of Geophysical Research*, vol. 99, N° C12.
- Environment Agency (2011), *Coastal flood boundary conditions for UK mainland and islands*, Copenhagen.
- EuroSION (2004), "Living with coastal erosion in Europe: sediment and space for sustainability. Part-1 Major Findings and Policy Recommendations of the EUROSION Project", Directorate General Environment European Commission.
- EurOtop (2007), *Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*, T. Pullen y otros (eds.), Hamburgo.
- FEMA (Federal Emergency Management Agency) (2013), *Multi-hazard loss estimation methodology, flood model, HAZUS, technical manual*, Washington, D.C., Department of Homeland Security, Emergency Preparedness and Response Directorate, Mitigation Division.
- Gallina, V. y otros (2016), "A review of multi-risk methodologies for natural hazards: Consequences and challenges for a climate change impact assessment", *Journal of Environmental Management*, vol.168.
- GIOC (Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas) (1999), "Documentación del programa MSP-Espectral", Santander, Universidad de Cantabria.
- Gouldby, B. y otros (2014), "A methodology for deriving extreme nearshore sea conditions for structural design and flood risk analysis", *Coastal Engineering*, vol. 88.
- \_\_\_\_\_ (2008), "A methodology for regional-scale flood risk assessment", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, vol. 161, N° 3.
- Grinsted, A., J.C. Moore y S. Jevrejeva (2010), "Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD", *Climate Dynamics*, vol. 34.
- Hadley, D. (2009), "Land use and the coastal zone", *Land Use Policy*, vol. 265.
- Hall, J.W., P.B. Sayers y R.J. Dawson (2005), "National-scale assessment of current and future flood risk in England and Wales", *Natural Hazards*, vol. 36.
- Hallegatte, S. (2009), "Strategies to adapt to an uncertain climate change", *Global Environmental Change*, vol. 19.
- Hallegatte, S. y otros (2013), "Future flood losses in major coastal cities", *Nature Climate Change*, vol. 3.
- Harley, M.D. y P. Ciavola (2013), "Managing local coastal inundation risk using real-time forecasts and artificial dune placements", *Coastal Engineering*, vol. 77.
- Heberger, M. y otros (2011), "Potential impacts of increased coastal flooding in California due to sea-level rise", *Climatic Change*, vol. 109.
- Hemer, M.A. y otros (2013), "Projected change in wave climate from a multi-model ensemble", *Nature Climate Change*, vol. 3.
- Hinkel, J. y otros (2014), "Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise", *PNAS*, vol. 111, N° 9.
- \_\_\_\_\_ (2013), "A global analysis of erosion of sandy beaches and sea-level rise: An application of DIVA", *Global and Planetary Change*, vol. 111.



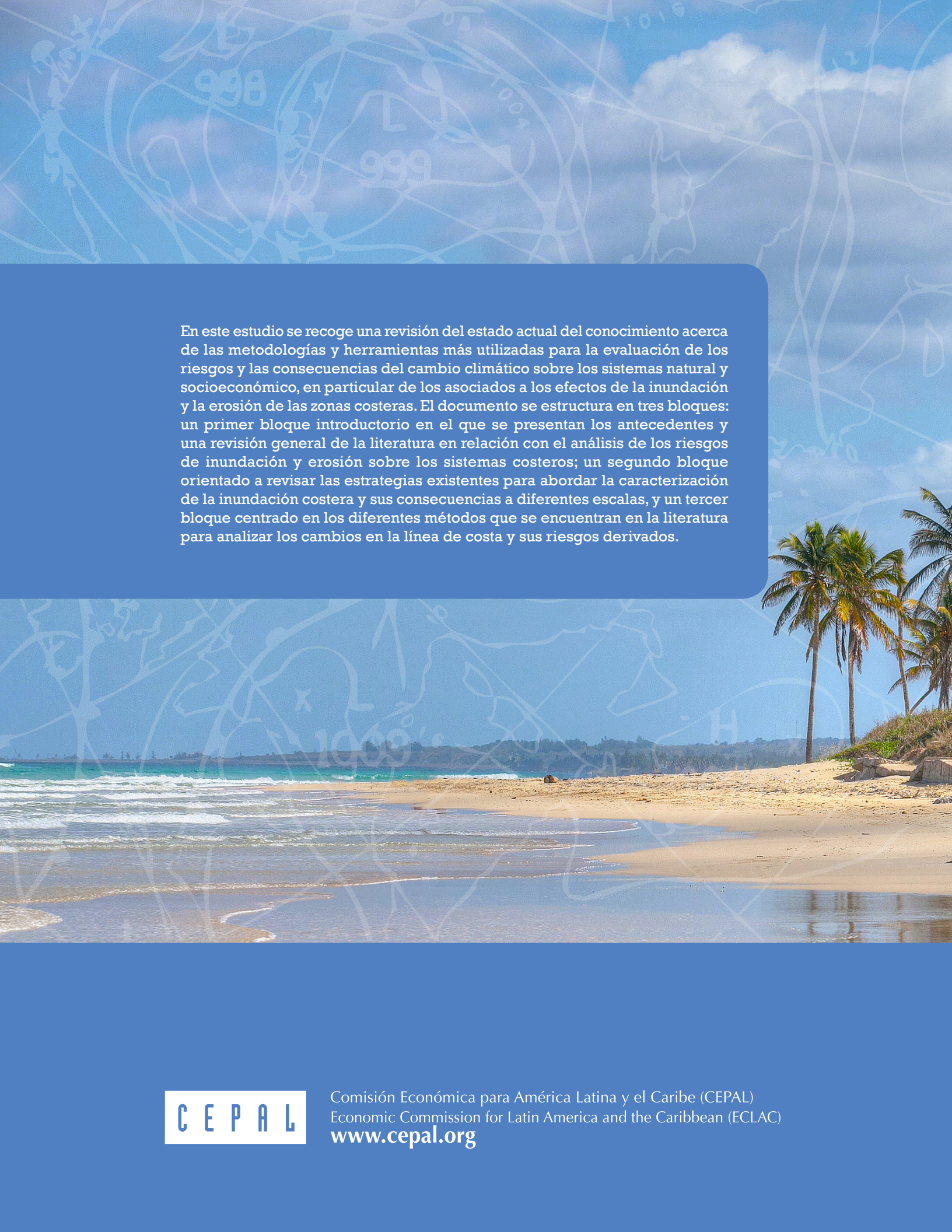
- Horsburgh, K. y otros (2017), “Hydrological risk: wave action, storm surge and coastal flooding”, *Science for disaster risk management 2017: knowing better and losing less*, K. Poljansek y otros (eds.), Luxemburgo.
- Houston, J.R. (2013), “The economic value of beaches – a 2013 update”, *Shore & Beach*, vol. 81.
- \_\_\_\_\_. IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) (2014), “Summary for policymakers”, *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- \_\_\_\_\_. (2013), “Summary for policymakers”, *Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, T.F. Stocker y otros (eds.), Cambridge University Press.
- \_\_\_\_\_. (2012), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, C.B. Field, Cambridge University Press.
- Jackson, A.C. y J. McIlvenny (2011), “Coastal squeeze on rocky shores in northern Scotland and some possible ecological impacts”, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, vol. 400.
- Jamieson, S. y otros (2012), “A highly efficient 2D flood model with sub-element topography”, *Water Management*, vol. 165, N° 10.
- Jiménez, J.A. y otros (2012), “Storm-induced damages along the Catalan coast (NW Mediterranean) during the period 1958-2008”, *Geomorphology*, vol. 143-144.
- \_\_\_\_\_. (2007), “SGJ Aarnikhof, Beach recreation planning using video-derived coastal state indicators”, *Coastal Engineering*, vol. 54.
- Jongejan, R. y otros (2016), “Drawing the line on coastline recession risk”, *Ocean & Coastal Management*, vol. 122.
- King, P. y D. Symes (2003), *The Potential Loss in Gross National Product and Gross State Product from a Failure to Maintain California's Beaches*, San Francisco State University.
- King, P.G., A.R. McGregor y J.D. Whittet (2016), “Can California coastal managers plan for sea-level rise in a cost effective way?”, *Journal of Environmental Planning and Management*, vol. 59, N° 1.
- Kriebel, D.L. y R.G. Dean (1993), “Convolution method for time-dependent beach-profile response”, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, vol. 119.
- Lara, J.L., A. Ruju e I.J. Losada (2011), “Reynolds averaged Navier–Stokes modelling of long waves induced by a transient wave group on a beach”, *Proceedings of the Royal Society a Mathematical, Physical and Engineering Sciences*.
- Larson, M., L. Erikson y H. Hanson (2004), “An analytical model to predict dune erosion due to wave impact”, *Coastal Engineering*, vol. 51.
- Leatherman, S.P., K Zhang y B.C. Douglas (2000), “Sea level rise shown to drive coastal erosion”, *EOS Transactions*, vol. 81.
- Leonard, M. y otros (2014), “A compound event framework for understanding extreme impacts”, *WIRES Climate Change*, vol. 5.
- L’homme, J. y otros (2010), “Testing a new two-dimensional flood modelling system: analytical tests and application to a flood event”, *Journal of Flood Risk Management*, vol. 3, N° 1.
- Lin, N. y otros (2010), “Risk assessment of hurricane storm surge for New York City”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 115.
- Liu, P.L.-F. e I.J. Losada (2002), “Wave propagation modeling in coastal engineering”, *Journal of Hydraulic Research*, vol. 40, N° 3.
- Liverman, D.M. (1990), “Drought impacts in Mexico: climate, agriculture, technology, and land tenure in Sonora and Puebla”, *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 80.
- Loomis, J. y L. Santiago (2013), “Economic valuation of beach quality improvements: comparing incremental attribute values estimated from two stated preference valuation methods”, *Coastal Management*, vol. 41.
- Losada, I.J. (2008), “Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters”, *Coastal Engineering*, vol. 55, N° 1.
- Losada, I.J., A. Toimil y P. Díaz-Simal (2016), “Costes de la inacción debidos al efecto del cambio climático en la costa del Principado de Asturias”, Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.
- Luijendijk, A.P. (2017), “The initial morphological response of the San Engine: a process-based modelling study”, *Coastal Engineering*, vol. 119.

- McCall, R.T. (2014), "Modelling storm hydrodynamics on gravel beaches with XBeach-G", *Coastal Engineering*, vol. 91.
- McMillan, A. y otros (2011), "Coastal Flood Boundary Conditions for UK Mainland and Islands. Project: SC060064/TR2: Design SEA Levels", Bristol, Environment Agency.
- Mendoza, E.T. y J.A. Jiménez (2006), "Storm-induced beach erosion on the Catalonian coast", *Journal of Coastal Research*, vol. 48.
- Merz, B. y otros (2010), "Assessment of economic flood damage", *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 10, N° 8.
- Miller, J.K. y R.G. Dean (2004), "A simple new shoreline change model", *Coastal Engineering*, vol. 51.
- Mimura, N. y H. Nobuoka (1995), "Verification of Bruun Rule for the estimate of shoreline retreat caused by sea-level rise", *Coastal Dynamics - Proceedings of the International Conference*, vol. 95.
- Mokrech, M. y otros (2008), "Regional impact assessment of flooding under future climate and socio-economic scenarios for East Anglia and North West England", *Climatic Change*, vol. 90.
- Morgan, R. (1999), "A novel, user-based rating system for tourist beaches", *Tourism Management*, vol. 20.
- Moss, R.H. y otros (2010), "The next generation of scenarios for climate change research and assessment", *Nature*, vol. 463.
- Muis, S. y otros (2016), "A global reanalysis of storm surges and extreme sea levels", *Nature Communications*, vol. 7.
- \_\_\_\_\_ (2015), "Flood risk and adaptation strategies under climate change and urban expansion a probabilistic analysis using global data", *Science of the Total Environment*, vol. 538.
- Nicholls, R.J. y otros (2011), "Sea-level rise and its possible impacts given a 'beyond 4°C world' in the twenty-first century", *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 369.
- \_\_\_\_\_ (2008), "Screening Study: Ranking Port Cities with High Exposure and Vulnerability to Climate Extremes", *OECD Environment Working Papers*, No. 1, París, OECD Publishing.
- Parsons, G.R. y M. Powell (2001), "Measuring the cost of beach retreat", *Coastal Management*, vol. 29.
- Penning-Rowsell, E. y otros (2005), *The Benefits of Flood and Coastal Risk Management: A Manual of Assessment Techniques*, Middlesex University Press.
- Pérez, J., M., Menéndez, e I. J. Losada (2017), "GOW2: A global wave hindcast for coastal applications", *Coastal Engineering*, vol. 124.
- Phillips, M.R. y A.L. Jones (2006), "Erosion and tourism infrastructure in the coastal zone: Problems, consequences and management", *Tourism Management*, vol. 27.
- Prime, T., J.M. Brown y A.J. Plater (2015), "Physical and economic impacts of sea-level rise and low probability flooding events on coastal communities", *PLoS ONE*, vol. 10, N° 2.
- Pullen, T. y otros (2007), *EurOtop, European Overtopping Manual: Wave overtopping of sea defences and related structures: Assessment manual*, Environment Agency.
- Rahmstorf, S. (2007), "A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise", *Science*, vol. 315.
- Ranasinghe, R. (2016), "Assessing climate change impacts on open sandy coasts: A review", *Earth-Science Reviews*, vol. 160.
- Ranasinghe, R. y M. J. F., Stive (2009), "Rising seas and retreating coastlines", *Climatic Change*, vol. 97.
- Ranasinghe, R., D. Callaghan y M.J.F. Stive (2012), "Estimating coastal recession due to sea level rise: beyond the Bruun rule", *Climatic Change*, vol. 110.
- Ranasinghe, R. y otros (2013), "Climate-change impact assessment for inlet-interrupted coastlines", *Nature Climate Change*, vol. 3.
- Reguero, B.G. y otros (2015), "Effects of Climate Change on Exposure to Coastal Flooding in Latin America and the Caribbean", *PLoS One*.
- Revell, D.L. y otros (2011), "A methodology for predicting future coastal hazards due to sea-level rise on the California Coast", *Climatic Change*, vol. 109.
- Roca, E., M. Villares y M. I. Ortego (2009), "Assessing public perceptions on beach quality according to beach users' profile: A case study in the Costa Brava (Spain)", *Tourism Management*, vol. 30.
- Roelvink, D. y otros (2009), "Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands", *Coastal Engineering*, vol. 56.
- Rosati, J.D., R.G. Dean y T.L. Walton (2013), "The modified Bruun Rule extended for landward transport", *Marine Geology*, vol. 340.

- Rosenzweig, C. y otros (2011), “Developing coastal adaptation to climate change in the New York City infrastructure-shed; process, approach, tools, and strategies”, *Climatic Change*, vol. 106.
- Rueda, A. y otros (2017), “A global classification of coastal food hazard climates associated with large-scale oceanographic forcing”, *Scientific Reports*, vol. 7, N° 1.
- Sardá R., y otros (2009), “Decadal shifts in beach user sand availability on the Costa Brava (Northwestern Mediterranean Coast)”, *Tourism Management*, vol. 30.
- Schliephack, J. y J.E. Dickinson (2017), “Tourists’ representations of coastal managed realignment as a climate change adaptation strategy”, *Tourism Management*, vol. 59.
- Serafin, K. y P. Ruggiero (2014), “Simulating extreme total water levels using a time-dependent, extreme value approach”, *Journal of Geophysical Research, Oceans*, vol. 119, N° 9.
- Sierra, J.P. y M. Casas-Prat (2014), “Analysis of potential impacts on coastal areas due to changes in wave conditions”, *Climatic Change*, vol. 124.
- Simmons, D. C., y otros (2017b), “Qualitative and quantitative approaches to risk assessment”, *Science for disaster risk management 2017: knowing better and losing less*, K. Poljansek y otros (eds.), Luxemburgo.
- Solari, S. y P.H. van Gelder (2012), “On the use of vector autoregressive VAR and regime switching VAR models for the simulation of sea and wind state parameters”, C. Guedes Soares y otros (eds.), *Marine Technology and Engineering*, Londres, Taylor&Francis Group.
- Splinter, K.D. y otros (2014), “A generalized equilibrium model for predicting daily to interannual shoreline response”, *Journal of Geophysical Research, Earth Surf*, vol. 119.
- SREX (2012), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, C.B. Field y otros (eds.), Cambridge University Press.
- Stern, N. (2007), *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge University Press.
- Stive, M.J.F. (2004), “How important is global warming for coastal erosion?”, *Climatic Change*, vol. 64, N° 27.
- Stive, M.J.F., R. Ranasinghe y P. Cowell (2009), “Sea level rise and coastal erosion”, *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*, Y. Kim (ed.), World Scientific.
- Stive, M.J.F. y otros (2002), “Variability of shore and shoreline evolution”, *Coastal Engineering*, vol. 47.
- Stockdon, H.F. y otros (2006), “Empirical parameterization of setup, swash, and runup”, *Coastal Engineering*, vol. 53.
- Stripling, S. y otros (2017), “Regional-scale probabilistic shoreline evolution modelling for flood-risk assessment”, *Coastal Engineering*, vol. 121.
- Thieken, A. y otros (2006), “Methods for flood risk assessment: Concepts and challenges”, document presentado en “International Workshop on Flash Floods in Urban Areas”, Muscat – Sultanate of Oman, 4-6 de septiembre.
- Titus, J.G. y otros (1991), “Greenhouse effect and sea level rise: The cost of holding back the sea”, *Coastal Management*, vol. 19.
- Toimil, A. (2018), “A framework for the multi-sectoral assessment of climate change risks in coastal areas”, tesis para optar al grado de doctorado, Santander, Universidad de Cantabria.
- Toimil, A., I.J. Losada y P. Camus (2016), “Metodología para el análisis del efecto del cambio climático en la inundación costera: aplicación a Asturias”, *RIBAGUA*, vol. 3.
- Toimil, A. y otros (2018), “Estimating the risk of loss of beach recreation value under climate change”, *Tourism Management*, vol. 68.
- \_\_\_\_\_ (2017a), “Multi-sectoral high-resolution assessment of climate change consequences of coastal flooding”, *Climatic Change*, vol. 145.
- \_\_\_\_\_ (2017b), “Managing coastal erosion under climate change at the regional scale”, *Coastal Engineering*, vol. 128.
- US Army Corps of Engineers (1994), *Shoreline protection and beach erosion control study. Phase 1: Cost comparison of shoreline protection projects of the US Corps of Engineers*, Washington, D.C., Water Resources Support Centre [en línea] <http://www.iwr.usace.army.mil/Portals/70/docs/iwrreports/94-PS-1.pdf>.
- Wainwright, D.J. y otros (2015), “Moving from deterministic towards probabilistic coastal hazard and risk assessment: Development of a modelling framework and application to Narrabeen Beach, New South Wales, Australia”, *Coastal Engineering*, vol. 96.

- Wong, P.P. y otros (2014), “Coastal systems and low-lying areas”, *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- Zacharioudaki, A. y D.E. Reeve (2011), “Shoreline evolution under climate change wave scenarios”, *Climatic Change*, vol. 108.
- Zhang, K., B.C. Douglas y S.P. Leatherman (2004), “Global warming and coastal erosion”, *Climatic Change*, vol. 64.
- Zijlema, M., G. Telling y P. Smit (2011), “SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters”, *Coastal Engineering*, vol. 58, N° 10.





En este estudio se recoge una revisión del estado actual del conocimiento acerca de las metodologías y herramientas más utilizadas para la evaluación de los riesgos y las consecuencias del cambio climático sobre los sistemas natural y socioeconómico, en particular de los asociados a los efectos de la inundación y la erosión de las zonas costeras. El documento se estructura en tres bloques: un primer bloque introductorio en el que se presentan los antecedentes y una revisión general de la literatura en relación con el análisis de los riesgos de inundación y erosión sobre los sistemas costeros; un segundo bloque orientado a revisar las estrategias existentes para abordar la caracterización de la inundación costera y sus consecuencias a diferentes escalas, y un tercer bloque centrado en los diferentes métodos que se encuentran en la literatura para analizar los cambios en la línea de costa y sus riesgos derivados.

CEPAL

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)  
Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC)  
[www.cepal.org](http://www.cepal.org)