# Guía para el análisis regional del riesgo de erosión e inundación costera considerando los efectos del cambio climático

# Plan Estratégico Nacional Protección de la Costa Española considerando los Efectos del

Cambio Climático

Siguiendo el requerimiento del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), Gobierno de España

Proyecto N.º: REFORM-GA2020-021



### Nota editorial:

Guía para el análisis regional del riesgo de erosión e inundación costera considerando los efectos del cambio climático del Plan Estratégico Nacional para la Protección de la Costa Española considerando los Efectos del Cambio Climático. Guía técnica. Siguiendo el requerimiento del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), Gobierno de España. Diciembre 2022.



**Autores:** El equipo redactor de esta guía se compone de los siguientes miembros del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria): Jara Martínez Sánchez, Raúl Medina Santamaría, Juan Jesús Viadero Andrés y Albert Gallego Jiménez.

En el desarrollo del proyecto ha participado un equipo pluridisciplinar liderado por la Coastal & Marine Union (EUCC), con miembros del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria) y el Instituto Universitario de Investigación en Acuicultura Sostenible y Ecosistemas Marinos (IU-ECOAQUA), de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC).







Agradecimientos: El equipo coordinador y redactor agradece sus contribuciones a Ángel Muñoz Cubillo y Ana García Fletcher de la Dirección General de la Costa y el Mar del MITECO, así como al personal técnico de las demarcaciones de costas y servicios provinciales; a los expertos internacionales Patrycja Enet (Francia), Cathal O'Mahony (Irlanda), Luigi Cipriani (Italia) y José Carlos Ferreira (Portugal); al Instituto Pascual Madoz del Territorio, Urbanismo y Medio Ambiente de la Universidad Carlos III de Madrid; y a la Dirección General de Apoyo a las Reformas Estructurales de la Unión Europea (DG REFORM).

Este proyecto está financiado por el Programa de Apoyo a las Reformas Estructurales de la Unión Europea e implementado por EUCC y sus socios, en colaboración con la Comisión Europea.



Para más información:

https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/estrategias-proteccion-costa/

Contacto en el MITECO: Ana García Fletcher agfletcher@miteco.es

© Todas las fotos del MITECO

# Guía para el análisis regional del riesgo de erosión e inundación costera considerando los efectos del cambio climático





### Índice

1.	INTR	ODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	7
2.	ANÁI	ISIS DEL RIESGO DE EROSIÓN COSTERA	9
		2.1.1 Marco conceptual	9
		2.1.2 Flujo de trabajo del análisis del riesgo	11
	2.2	Análisis de la peligrosidad	13
		2.2.1 Modelo morfodinámico de funcionamiento	15
		2.2.2 Erosión crónica	17
		2.2.3 Eventos erosivos	19
	2.3	Análisis de vulnerabilidad	20
		2.3.1 Indicadores de exposición y sensibilidad	20
		2.3.2 Área expuesta	22
	2.4	Análisis del riesgo	23
		2.4.1 Riesgos desagregados	23
		2.4.2 Riesgos agregados	25
3.	ANÁI	ISIS DEL RIESGO COMBINADO DE EROSIÓN E INUNDACIÓN COSTERA	27
	3.1	Datos de partida	27
		3.1.1 Horizontes futuros y escenarios	27
		3.1.2 Escalas geográficas	28
		3.1.3 Resultados del riesgo y sus componentes	28
	3.2	Metodología	31
		3.2.1 Caracterización del riesgo de inundación con base en un nivel numérico	32
		3.2.2 Armonización de horizontes futuros y escenarios	32
		3.2.3 Armonización de escalas geográficas	33
		3.2.4 Combinación algebraica ponderada	33
4.	CON	CLUSIONES	35



### 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El *Plan Estratégico Nacional para la protección de la costa española considerando los efectos del cambio climático* (de ahora en adelante, *Plan Estratégico Nacional*) pretende proporcionar un enfoque coherente en el ámbito nacional, que garantice la armonización regional y la aplicación de las medidas de protección de la costa más adecuadas para todo el litoral español, entendidas como todas aquellas actuaciones para la gestión y protección de la costa que recaen dentro de las funciones encomendadas a la DGCM, fundamentalmente en relación a la gestión del riesgo de erosión de la costa, pero también buscando sinergias con la gestión del riesgo de la inundación e incorporando la adaptación al cambio climático.

Las actuaciones de ámbito nacional propuestas en el *Plan Estratégico Nacional* deben complementarse con actuaciones de ámbito regional y local descritas en las **Estrategias para la Protección de la Costa, considerando los efectos del cambio climático** (de ahora en adelante *Estrategias Regionales*) que deben elaborarse a nivel de cada una de las **25 Unidades de Análisis** en las que se ha segmentado la costa española<sup>1</sup>.

Así pues, como parte de los trabajos de elaboración del *Plan Estratégico Nacional*, se ha desarrollado la **Guía para el desarrollo de estrategias regionales para la protección de la costa**, que señala la necesidad de abordar el análisis del riesgo de erosión e inundación costera, considerando los efectos del cambio climático, como componente fundamental del diagnóstico a partir del cual se debe construir la *Estrategia Regional* correspondiente a cada Unidad de Análisis.

<sup>1 1)</sup> Pontevedra (Galicia), 2) A Coruña (Galicia), 3) Lugo (Galicia), 4) Principado de Asturias, 5) Cantabria, 6) Bizkaia (País Vasco), 7) Gipuzkoa (País Vasco), 8) Girona (Cataluña), 9) Barcelona (Cataluña), 10) Tarragona (Cataluña), 11) Castellón (Comunidad Valenciana), 12) Valencia (Comunidad Valenciana), 13) Alicante (Comunidad Valenciana), 14) Región de Murcia, 15) Almería (Andalucía), 16) Granada (Andalucía), 17) Málaga (Andalucía), 18) Cádiz (Andalucía), 19) Sevilla (Andalucía), 20) Huelva (Andalucía), 21) Islas Baleares, 22) Las Palmas (Canarias), 23) Santa Cruz de Tenerife (Canarias), 24) Ciudad Autónoma de Ceuta, 25) Ciudad Autónoma de Melilla.



En el presente documento se presenta una propuesta metodológica para llevar a cabo dicho análisis de riesgos, la cual ha sido desarrollada de acuerdo a los métodos descritos por las recientes *Estrategias Regionales* en las Islas Baleares, Cádiz, Málaga y Almería<sup>2</sup> y concuerda con lo indicado en la mencionada guía respecto a la escala espacial, horizontes y escenarios requeridos para el análisis:

- El análisis debe realizarse a nivel de las decenas o cientos de **Unidades de Gestión** (de ~1 km de longitud de costa) en las que se divide la Unidad de Análisis. Los métodos para llevar a cabo esta segmentación se detallan en la **Guía para el desarrollo de estrategias regionales para la protección de la costa**.
- El análisis debe llevarse a cabo para diversos horizontes relativos a la situación actual, el corto, medio y largo plazo y bajo diversos escenarios de cambio climático o de gestión. La Guía para el desarrollo de estrategias regionales para la protección de la costa detalla las directrices a seguir para la selección del año de referencia de la situación actual, los horizontes futuros y los escenarios a considerar.

En España, el riesgo de inundación como tal tiene su propio marco de gestión según la Directiva de Inundaciones de la UE y el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de Evaluación y Gestión de Riesgos de Inundación, y los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación de las Demarcaciones Hidrográficas incorporan la caracterización de las componentes del riesgo de inundación. Por tanto, en el marco de las *Estrategias Regionales*, la inundación se debe tratar en todo caso en combinación con la erosión costera y nunca como amenaza individual, utilizándose los resultados existentes del riesgo de inundación. Por ello, el presente documento se organiza en los siguientes 4 capítulos:

- Capítulo 1. Introducción y antecedentes.
- Capítulo 2. Análisis del riesgo de erosión costera, en el que se describe una propuesta metodológica para el análisis de cada una de las componentes del riesgo (peligrosidad y vulnerabilidad) y se detalla el método propuesto para combinar estas componentes obteniendo tanto resultados del riesgo desagregado para cada tipo de elemento expuesto, como agregado para el sistema costero en su conjunto o para cada uno de sus subsistemas: medio humano, medio natural, medio socioeconómico e infraestructuras críticas.
- Capítulo 3. Análisis del riesgo combinado de erosión e inundación costera, en el que se describe la metodología propuesta para combinar los resultados del riesgo de erosión costera obtenidos según se indica en el Capítulo 2 con los resultados del análisis de riesgos de inundación costera obtenidos de los planes de gestión del riesgo de inundación disponibles.
- Capítulo 4. Conclusiones.

<sup>2</sup> Disponibles en: https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/estrategias-proteccion-costa/

### 2. ANÁLISIS DEL RIESGO DE EROSIÓN COSTERA

En este capítulo se describe la metodología propuesta para el análisis del riesgo de erosión costera en cada Unidad de Gestión, tanto para la situación actual como en futuros horizontes, la cual se corresponde con la previamente desarrollada para las *Estrategias Regionales* en las Islas Baleares, Cádiz, Málaga y Almería.

En primer lugar, se describe a modo de introducción el marco conceptual del análisis (véase sección 2.1.1) y el flujo de trabajo propuestos (véase sección 2.1.2). A continuación, se detallan los métodos propuestos para el análisis de cada una de las componentes del riesgo: peligrosidad (véase sección 2.2), exposición (véase sección 2.3.2) y vulnerabilidad (véase sección 2.3). Finalmente (véase sección 2.4), se expone el método para combinar estas componentes y obtener los resultados de riesgos desagregados y agregados para el sistema costero en su conjunto o a nivel de sus subsistemas (*i.e.*, medio humano, medio natural, medio socioeconómico e infraestructuras críticas).

### 2.1.1. Marco conceptual

En el presente análisis y en línea con los conceptos definidos por el IPCC<sup>3</sup> y adoptados en la *Estrategia de Adaptación al Cambio Climático de la Costa Española*<sup>4</sup>, se concibe el *riesgo* como las potenciales *consecuencias negativas* sobre los diversos *elementos de valor* que se encuentra expuestos a la erosión costera.

En ese sentido, deben considerarse al menos los siguientes elementos de valor organizados según cuatro subsistemas del sistema costero (véase Tabla 1).

Tabla 1. Elementos de valor expuestos en el sistema costero.

Subsistema costero	Elemento de valor
Medio humano	<ul><li>Población residente</li><li>Población visitante</li></ul>
Medio natural	<ul> <li>Áreas naturales</li> <li>Playas, incluyendo sus dunas</li> <li>Aguas de transición</li> <li>Acantilados</li> </ul>
Medio socioeconómico	<ul> <li>Área urbana</li> <li>Actividades económicas</li> <li>Ocupaciones del DPMT</li> <li>Frente costero construido</li> </ul>
Infraestructuras críticas	<ul> <li>Abastecimiento</li> <li>Saneamiento</li> <li>Transporte</li> <li>Comunicaciones</li> <li>Energía</li> <li>Industria</li> <li>Patrimonio</li> </ul>

<sup>3</sup> IPCC, 2019: Annex I: Glossary [Weyer, N.M. (ed.)]. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In Press

<sup>4</sup> Aprobada el 24 de julio de 2017, publicada 14 agosto de 2017.

La metodología propuesta, de carácter semi-cuantitativo, se basa en estudios previos (*e.g.*, Aguirre-Ayerbe et al., 2018<sup>5</sup>, INFORM, 2017<sup>6</sup>, Birkmann et al. 2013<sup>7</sup>) y concuerda con los conceptos del IPCC<sup>8</sup>, según los cuales el riesgo existente sobre cada elemento de valor expuesto a una amenaza se obtiene a través de la interacción dinámica de la peligrosidad y la vulnerabilidad de dicho elemento (véase Figura 1).



Figura 1. Componentes del riesgo.

En concreto, la peligrosidad considerada en este análisis es la erosión costera y las consecuencias negativas que se derivan de ella (*i.e.*, el riesgo) dependen de la vulnerabilidad de los elementos de valor expuestos, entendida como la propensión o predisposición de estos elementos a verse efectivamente afectados de forma negativa.

La vulnerabilidad se expresa por tanto como una función de la exposición y de la sensibilidad de los elementos expuestos. Entendiendo la exposición como la presencia de elementos de valor que podrían verse afectados por la erosión y su sensibilidad como las condiciones y características de estos elementos expuestos que condicionan su propensión o predisposición a ser afectados negativamente.

Siguiendo la metodología semi-cuantitativa propuesta, cabe señalar que tanto el riesgo como el resto de sus componentes se expresan en términos cualitativos mediante clases o niveles que se establecen a partir de indicadores asociados a distintas variables cuantitativas que permiten caracterizar la peligrosidad, exposición o vulnerabilidad, tal y como se detalla más adelante en este capítulo (véanse secciones 2.2, 2.3.2 y 2.3).

Finalmente, los resultados desagregados asociados a cada uno de los elementos de valor se agregan tanto por componentes del riesgo como por subsistemas del sistema costero, de acuerdo a los pesos relativos de cada elemento (véase sección 2.4). Así se obtienen los siguientes resultados:

- Nivel de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo desagregado para cada elemento de valor.
- Nivel de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo agregado para el conjunto de elementos de valor en cada uno de los subsistemas del sistema costero (*i.e.*, medio humano, medio natural, medio socioeconómico e infraestructuras críticas).
- Nivel de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo agregado para el conjunto de elementos de valor existentes en el sistema costero.

<sup>5</sup> Aguirre-Ayerbe, I., Martínez Sánchez, J., Aniel-Quiroga, Í., González-Riancho, P., Merino, M., Al-Yahyai, S., González, M., and Medina, R.: From tsunami risk assessment to disaster risk reduction – the case of Oman, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 18, 2241- 2260, https://doi.org/10.5194/nhess-18-2241-2018, 2018.

<sup>6</sup> INFORM: Index for Risk Management. Results 2017. Inter-Agency Standing Committee Reference Group on Risk, Early Warning and Preparedness and European Commission, 2017.

<sup>7</sup> Birkmann, J., Cardona, O. D., Carreño, M. L., Barbat, A. H., Pelling, M., Schneiderbauer, S., Kienberger, S., Keiler, M., Alexander, D., Zeil, P., and Welle, T.: Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework, Nat. Hazards, 67, 193–211, 2013.

<sup>8</sup> IPCC, 2019: Annex I: Glossary [Weyer, N.M. (ed.)]. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In Press

### 2.1.2. Flujo de trabajo del análisis del riesgo

En esta sección se presenta el flujo de trabajo del análisis del riesgo propuesto en consonancia con el marco conceptual descrito anteriormente.

En primer lugar, cabe repetir que el objetivo de la *Estrategia Regional* es proponer medidas de gestión del riesgo costero que permitan mantener o reducir el actual nivel de riesgo en el futuro. Por ello es necesario que el análisis del riesgo proporcione información sobre los riesgos agregados a nivel del sistema costero en su conjunto, pero también desagregados a nivel de cada subsistema del mismo e, incluso en un nivel mayor de desagregación, a nivel de cada elemento de valor. De este modo el análisis de riesgo permitirá alimentar adecuadamente la toma de decisiones relativa a las medidas de gestión del riesgo de la *Estrategia Regional*.

De hecho, el flujo de trabajo propuesto parte del análisis del riesgo desagregado para cada elemento de valor, para posteriormente agregar resultados y obtener en primer lugar el riesgo por subsistema costero y finalmente para el sistema costero en su conjunto.

Por tanto, en términos simplificados, la primera pregunta específica a la que debe responder el análisis de riesgo propuesto es la siguiente:

¿Cuáles son las potenciales CONSECUENCIAS NEGATIVAS sobre cada ELEMENTO DE VALOR del sistema costero que se encuentra en peligro?

Dado el número y complejidad de conceptos definidos en las secciones previas, es necesario establecer un modo homogéneo de expresar los resultados del riesgo, por ello se reformula a continuación la anterior pregunta, incluyendo todos los términos técnicos del marco conceptual<sup>9</sup>:

¿Cuáles son las potenciales CONSECUENCIAS NEGATIVAS — nivel de RIESGO- que genera la erosión costera -PELIGROSIDAD- sobre cada ELEMENTO DE VALOR del sistema costero dentro de una UNIDAD DE GESTIÓN y para un AÑO HORIZONTE y ESCENARIO concretos, conocida la cantidad de elementos afectados -EXPOSICIÓN- y aquellas de sus características que los hacen susceptibles de sufrir daños -SENSIBILIDAD-?

De acuerdo a esta pregunta, el flujo de trabajo del análisis del riesgo desagregado para cada elemento de valor del sistema costero se muestra en la Figura 2. Además, en la Figura 3, se muestra un ejemplo de cálculo de riesgo desagregado, particularizada para la duna como elemento de valor del sistema costero según la metodología propuesta en la *Estrategia Regional* en las Islas Baleares.

Una vez obtenidos los riesgos desagregados se procede a su agregación según el esquema de la Figura 4. De nuevo, en la Figura 5, se muestra un ejemplo de cálculo de riesgo agregado de la *Estrategia Regional* en las Islas Baleares, particularizada para el medio natural.

Así, el análisis del riesgo agregado busca responder a la siguiente pregunta:

¿Cuáles son las potenciales CONSECUENCIAS NEGATIVAS sobre el MEDIO HUMANO, NATURAL, SOCIOECONÓMICO, INFRAESTRUCTURAS CRÍTICAS o sobre el SISTEMA COSTERO en su conjunto?

<sup>9</sup> Aguirre-Ayerbe, I.: Propuesta metodológica para la evaluación del riesgo de tsunami en zonas costeras. Aplicación en el litoral de El Salvador, MSc thesis, Earth Science Department, Universidad de Cantabria, Spain, 2011.

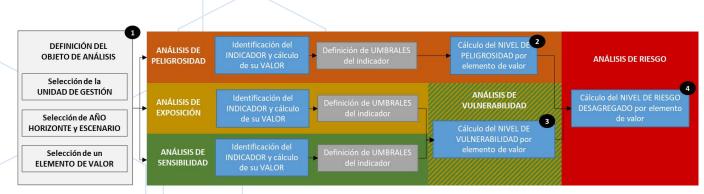


Figura 2. Esquema del flujo de trabajo para el análisis del riesgo desagregado.

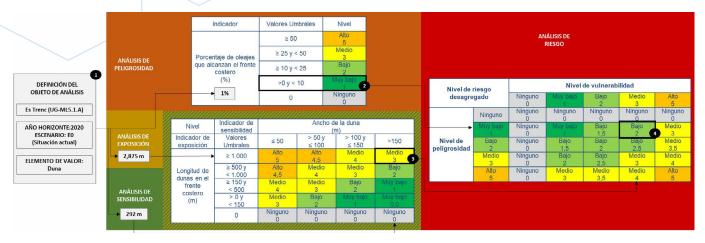


Figura 3. Ejemplo de cálculo del nivel de riesgo desagregado para la duna de la Estrategia Regional en las Islas Baleares.



Figura 4. Esquema del flujo de trabajo para el análisis del riesgo agregado.

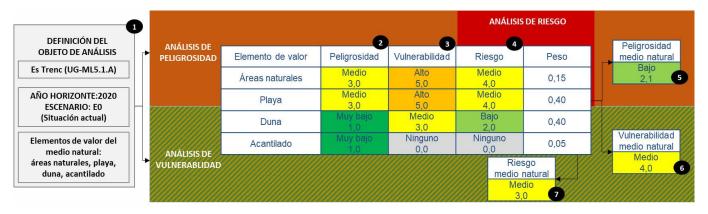


Figura 5. Ejemplo de cálculo del nivel de riesgo agregado para el medio natural de la *Estrategia Regional* en las Islas Baleares.

Tras esta introducción, la estructura del presente capítulo corresponde al flujo de trabajo descrito previamente. Así, a continuación, los detalles sobre el análisis de la peligrosidad se describen en la sección 2.2, los de la exposición en la sección 2.3.2, los de la vulnerabilidad en la sección 2.3 y los del riesgo en la sección 2.4, donde se incluye también todo lo relativo a la agregación de resultados.

### 2.2 Análisis de la peligrosidad

La **peligrosidad** se refiere al potencial acaecimiento de un **suceso** físico o una **tendencia** física que puede causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos sobre la salud, así como daños y pérdidas en propiedades, infraestructuras, medios de subsistencia, prestaciones de servicios, ecosistemas o recursos naturales<sup>10</sup>.

Según la metodología propuesta, el término peligrosidad hace referencia a la **erosión de la costa** a dos escalas temporales diferentes:

- **Erosión crónica (tendencia):** retroceso progresivo de la línea de costa derivada de un déficit crónico de sedimentos en el litoral que se manifiesta en el medio-largo plazo (meses-años-décadas) y no es recuperable.
- Eventos erosivos (suceso): sucesos erosivos puntuales asociados a temporales marinos que provocan un rápido retroceso de la línea de costa en el muy corto plazo (horas o días) pero pueden recuperarse en el medio plazo de forma natural tras el paso del temporal (meses-años) o que provocan
  daños permanentes en alguno de los elementos de valor del sistema costero por impacto directo
  del oleaje.

Se propone caracterizar cada uno de estos tipos de erosión a través de un indicador propio como se describe más adelante (véase sección 2.2.2 y 2.2.3). En ambos casos, el indicador propuesto depende fundamentalmente de la **posición de la línea de costa** en relación al **frente costero**, que se define como un límite morfodinámico situado en la posición del primero de los siguientes elementos desde la línea de costa hacia tierra (véase Figura 6):

- Paseos marítimo o vías de comunicación.
- Frente urbano construido.
- Estructuras de protección costera como muros verticales o escolleras.
- Frente natural vegetado.
- Pie de la duna.
- Pie de acantilado.

<sup>10</sup> Adaptado de UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction). Terminology. https://www.undrr.org/terminology (accessed July 2020).

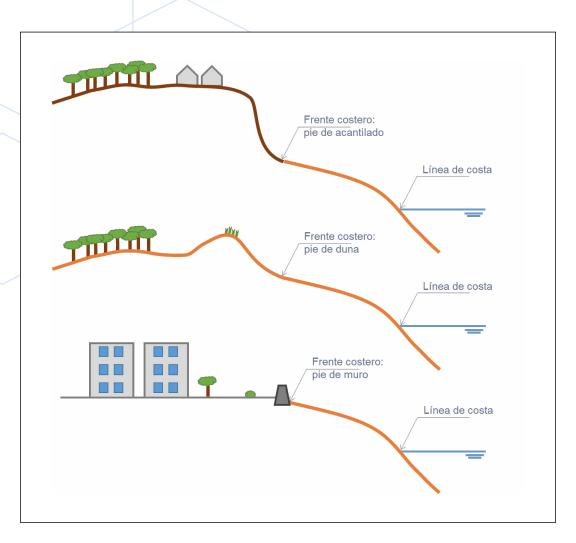


Figura 6. Diversos ejemplos de frente costero.



Por tanto, para determinar la posición de la línea de costa en la situación actual y en cada año horizonte y escenario considerado es imprescindible llevar a cabo el análisis del modelo morfodinámico de funcionamiento de la Unidad de Análisis, tal y como se detalla a continuación (véase 2.2.1).

### 2.2.1. Modelo morfodinámico de funcionamiento

El modelo morfodinámico tiene como objetivo caracterizar la geomorfología costera en la situación actual y en los horizontes futuros considerados, para lo cual es necesario predecir los cambios morfológicos vinculados a los procesos hidrodinámicos costeros y a las actuaciones humanas. En particular, es necesario determinar la posición de la línea de costa en el año de referencia para la situación actual y estimar el retroceso/avance que experimenta la misma para cada año horizonte y escenario considerado.

Para ello, existen en la literatura multitud de modelos numéricos, que a este documento no le corresponde describir, pero a los que se puede recurrir si se dispone de los recursos necesarios para su aplicación. En ese sentido, se recomienda emplear la metodología propuesta como parte del trabajo de "Elaboración de la metodología y bases de datos para la proyección de impactos de cambio climático a lo largo de la costa española", en concreto la metodología para el análisis de los impactos del cambio climático sobre la evolución de la línea de costa (IHCantabria, 2020¹¹). Dicha metodología se articula en torno a un nuevo modelo de erosión/acreción que reproduce la respuesta de la costa frente a la acción conjunta del oleaje y el nivel del mar, incluyendo el efecto de las actuaciones antrópicas y un algoritmo de asimilación de observaciones. Este modelo no solo permite determinar la evolución (histórica o proyectada en el futuro) de la posición media de la línea de costa considerando las fuentes de incertidumbre asociadas, sino también las variaciones estacionales y los retrocesos episódicos debidos a eventos extremos. Además, el modelo propuesto es modular, lo cual permite adaptar su aplicación a diferentes niveles de exigencia y complejidad según los recursos disponibles (i.e., datos de partida y capacidades), dotándolo de una gran flexibilidad.

<sup>11</sup> Disponible en "Metodologías y herramientas para el análisis de riesgos y la implementación de la adaptación al cambio climático en la costa" (páginas 89-193 de 376) en https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/estrategia-adaptacion-cambio-climatico/default.aspx.



No obstante, este tipo de modelado, aunque incorpora el mejor conocimiento científicotécnico disponible, puede resultar inabordable en el contexto de la elaboración de una *Estrategia Regional*. Para tales casos, se describe a continuación una metodología simplificada que permite el estudio del modelo morfodinámico de funcionamiento sin necesidad de modelado numérico. El método propuesto permite obtener tasas de erosión/acreción a partir del análisis de las líneas de costa históricas disponibles.

Así pues, el modelo morfodinámico de funcionamiento debe contener la siguiente información (véase Figura 7 y Figura 8), si no a nivel de las Unidades de Gestión (~1 km de longitud de costa), al menos a nivel de las Unidades Costeras (~10 km de longitud de costa) en las que se segmenta la franja costera, tal y como se detalla en la **Guía para el desarrollo de estrategias regionales para la protección de la costa**:

- Un resumen del clima marítimo.
- Una sucinta revisión de la dinámica litoral con mención expresa a las fuentes y sumideros de sedimentos.
- Una breve descripción de la evolución de la línea de costa, incluyendo valores de las siguientes tasas de erosión/acreción para cada una de las playas, en la medida en que se disponga de suficiente información (e.g., imágenes de satélites y ortofotografía aérea):
  - Tasa actual, referida a la evolución de la línea de costa en los últimos 10 años.
  - Tasa histórica, que expresa la evolución anterior a esos últimos 10 años y hasta que se disponga de registros.
  - Máxima variabilidad decadal, que se refiere al máximo desplazamiento de la línea de costa entre la posición más retranqueada y más avanzada de cada una de las últimas décadas para las que se disponga de información (véase Figura 7).

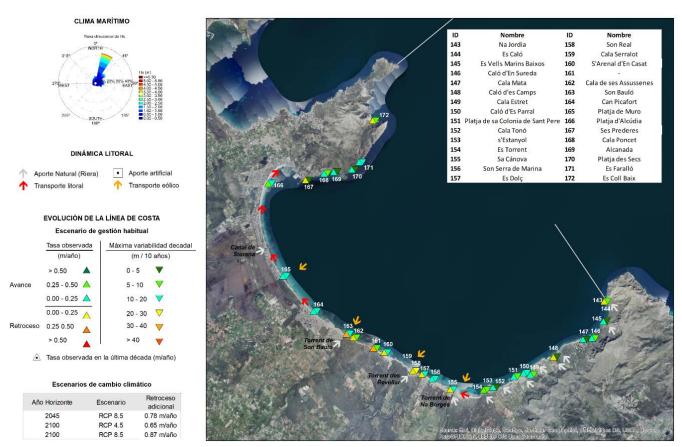
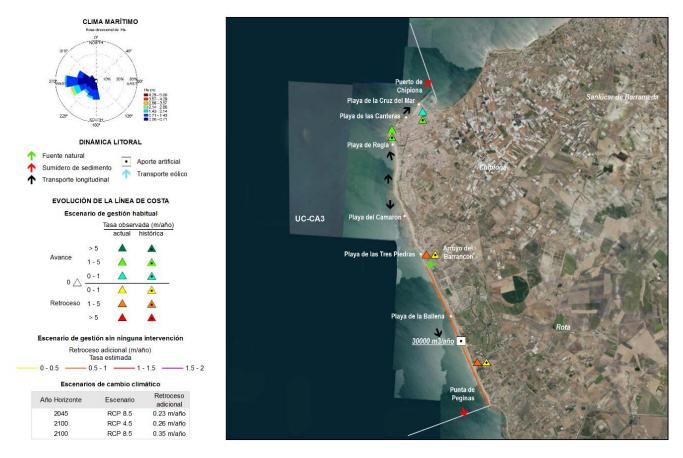


Figura 7. Ejemplo de información contenida en el modelo morfodinámico de funcionamiento en una Unidad Costera de la Estrategia Regional en las Islas Baleares.

- Una estimación del retroceso de la línea de costa (como tasa anual promedio) causado por efecto de la subida del nivel del mar en diversos horizontes y escenarios de cambio climático de acuerdo a la regla de Bruun<sup>12</sup>, según la cual la línea de costa retrocede de 50 a 100 veces lo que ascienda el nivel del mar según los escenarios considerados.
- Una estimación del retroceso de la línea de costa (como tasa anual promedio) derivado de dejar de realizar actuaciones de realimentación en aquellas playas sujetas a este tipo de actuaciones en la actualidad (véase Figura 8).



**Figura 8.** Ejemplo de información contenida en el modelo morfodinámico de funcionamiento en una Unidad Costera de la *Estrategia Regional* en Cádiz.

En resumen, el análisis del modelo morfodinámico de funcionamiento debe permitir, por un lado, caracterizar la peligrosidad asociada a la erosión costera crónica (véase sección 2.2.2) y asociada a eventos erosivos (véase sección 2.2.3) y, por otro, refinar la segmentación de la franja costera en Unidades de Gestión según la metodología propuesta en la **Guía para el desarrollo de estrategias regionales para la protección de la costa**.

### 2.2.2. Erosión crónica

El indicador propuesto para caracterizar la erosión crónica es el **ancho de playa seca**, entendido como la distancia horizontal entre la línea de costa y el frente costero (véase Figura 6), el cual se sitúa en el extremo hacia tierra del área de la playa dónde son aplicables las tasas de erosión observadas a partir de las líneas de costa históricas.

Según la metodología simplificada propuesta, la posición de la línea de costa en los diversos horizontes futuros se obtiene extrapolando hacia el futuro las tasas de erosión observadas a partir de líneas de costa

<sup>12</sup> https://diccionario.raing.es/es

históricas, añadiendo, si es de aplicación según el escenario considerado, los siguientes retrocesos adicionales, todos ellos obtenidos del modelo morfodinámico de funcionamiento (véase sección 2.2.1):

- La variabilidad decadal observada.
- Retroceso derivado del ascenso del nivel del mar asociado a un escenario de cambio climático.
- Retroceso derivado de no realizar aportaciones de áridos a las playas asociado a un escenario de gestión sin intervención.

Este método arroja resultados de incertidumbre creciente para los horizontes futuros más lejanos. Por tanto, los resultados de dicho análisis en el largo plazo deben interpretarse con cautela y su utilización en el marco del desarrollo de las *Estrategias Regionales* debe ser limitada.

En principio, la segmentación en Unidades de Gestión propuesta en la **Guía para el desarrollo de estrate-** gias regionales para la protección de la costa garantiza un ancho de playa seca relativamente uniforme en la Unidad de Gestión. Sin embargo, puede persistir una cierta variabilidad, sobre todo en el caso de que haya varias playas en la misma Unidad de Gestión. En tal caso, se deben ponderar los anchos de playa seca en función de las longitudes de cada playa para obtener un único ancho de playa seca representativo de toda la Unidad de Gestión.

A continuación, se propone obtener el nivel de peligrosidad de acuerdo a umbrales de este indicador de forma que las Unidades de Gestión se clasifican según cinco niveles de peligrosidad para la erosión crónica (véase Tabla 2). Estos umbrales pueden establecerse de acuerdo a un criterio experto o mediante algoritmos de clasificación automática<sup>13</sup>.

**Tabla 2.** Ejemplo de valores umbrales del indicador de ancho de playa seca y sus correspondientes niveles de peligrosidad para la erosión crónica de la *Estrategia Regional* en las Islas Baleares.

	Valores Umbrales	Nivel		
Indicador		Unidad de Gestión con playa	Unidad de Gestión sin playa	
	≤ 10	Alto 5		
	> 10 y ≤ 20	Medio 3		
Ancho de playa seca (m)	>20 y ≤ 30	Bajo 2	Ninguno 0	
	>30 y ≤ 40	Muy bajo 1		
	> 40	Ninguno 0		

Finalmente, en las Unidades de Gestión donde no hay playa susceptible de sufrir erosiones ni en la situación actual ni en el futuro, no hay peligrosidad asociada a la erosión crónica en ningún escenario (véase Tabla 2).

<sup>13</sup> e.g., Natural breaks classification method (Jenks, George F. 1967. "The Data Model Concept in Statistical Mapping", International Yearbook of Cartography 7: 186–190).

### 2.2.3. Eventos erosivos

El indicador seleccionado para caracterizar la erosión asociada a eventos hace referencia a los alcances que sufre el frente costero (véase Figura 6) por parte del oleaje durante los temporales, como un *proxy* de la peligrosidad asociada al daño potencial de los mayores oleajes al impactar sobre la costa. En concreto, este indicador es el **porcentaje de oleajes que alcanzan el frente costero**.

Al igual que en el caso del análisis de la evolución de la línea de costa (véase sección 2.2.1), en la literatura existen numerosos modelos numéricos y metodologías para cuantificar la inundación costera. En ese sentido, siempre que se disponga de recursos para ello, se recomienda emplear la metodología propuesta como parte del trabajo de "Elaboración de la metodología y bases de datos para la proyección de impactos de cambio climático a lo largo de la costa española", en concreto la metodología para el análisis de los impactos del cambio climático sobre la evolución de la línea de costa y la inundación de forma combinada (IHCantabria, 2020¹⁴).

No obstante, como alternativa simplificada para estimar estos alcances, se recomienda utilizar formulaciones semi-empíricas<sup>15</sup>, las cuales permiten obtener la excursión de cada oleaje sobre la pendiente de la playa seca. Comparando los valores de esta excursión con el ancho de playa seca existente en la Unidad de Gestión, el cual cambia según el escenario y año horizonte considerado, se obtiene el porcentaje de los oleajes que alcanzan el frente costero.

Al igual que en el caso de la peligrosidad asociada a la erosión crónica (véase sección 2.2.2), finalmente se clasifican las Unidades de Gestión de acuerdo a cinco niveles de peligrosidad asociada a eventos erosivos (véase Tabla 3).

**Tabla 3.** Ejemplo de valores umbrales del indicador de porcentaje de oleajes que alcanzan el frente costero y sus correspondientes niveles de peligrosidad para los eventos erosivos.

Indicador	Valores Umbrales	Nivel
	≥ 50	Alto 5
	≥ 25 y < 50	Medio 3
Porcentaje de oleajes que alcanzan el frente costero (%)	≥ 10 y < 25	Bajo 2
	>0 y < 10	Muy bajo 1
	0	Ninguno 0

<sup>14</sup> Disponible en "Metodologías y herramientas para el análisis de riesgos y la implementación de la adaptación al cambio climático en la costa" (páginas 195-243 de 376) en https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/estrategia-adaptacion-cambio-climatico/default.aspx.

<sup>15</sup> e.g., Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A., and Sallenger, A.H. 2006, Empirical parameterization of setup, swash, and runup: Coastal Engineering, v. 53, no. 7, p. 573-588

### 2.3 Análisis de vulnerabilidad

Como se ha mencionado anteriormente (véase sección 2.1.1), la **vulnerabilidad** se entiende como la **propensión** o **predisposición** de los elementos expuestos a verse efectivamente afectados de forma negativa, pudiendo comprender una variedad de conceptos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación del sistema costero frente a un impacto<sup>16</sup>. Por tanto, en el análisis de vulnerabilidad, ésta se expresa como una función de la exposición y de la sensibilidad (véase sección 2.3.1) de los elementos expuestos (véase sección 2.3.2).

### 2.3.1. Indicadores de exposición y sensibilidad

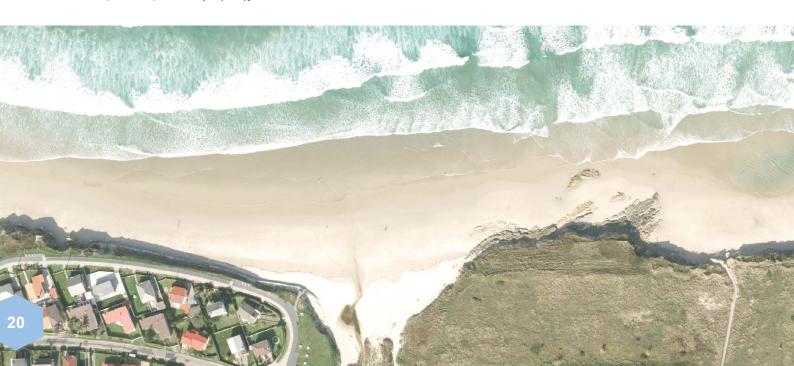
En línea con el el concepto de vulnerabilidad explicado anteriormente, en general, la vulnerabilidad de cada elemento de valor se estima a partir de la combinación de un indicador de exposición y otro de sensibilidad, aunque en algunos casos se puede considerar que todos los elementos expuestos son igualmente sensibles.

Al contrario que en el caso de la peligrosidad, los indicadores de exposición (incluida el área expuesta, véase sección 2.3.2) no cambian para los sucesivos horizontes futuros. Esta simplificación del análisis es consecuencia de la gran incertidumbre y falta de consenso en lo relativo a posibles escenarios de crecimiento demográfico, socioeconómico o cambios en el medio natural. En cualquier caso, la metodología propuesta es directamente aplicable considerando cualquier escenario que refleje este tipo de cambios, si es que hubiera suficiente información disponible al respecto, o en el marco de revisiones futuras del presente análisis.

A pesar de que los indicadores de exposición de todos los elementos se mantienen constantes bajo los diversos escenarios considerados, el nivel de vulnerabilidad sí cambia en los escenarios de gestión sin intervención para aquellos elementos del medio socioeconómico y las infraestructuras críticas que se encuentran bajo exposición directa. Esto es debido a que se asume la hipótesis de que la capacidad de estos elementos para resistir los eventos erosivos disminuye por la falta de mantenimiento de las estructuras costeras existentes o por no construir nuevas estructuras de defensa que pudieran ser necesarias y por tanto su nivel de sensibilidad aumenta.

Así pues, el análisis de vulnerabilidad consiste fundamentalmente en la determinación de indicadores de exposición y sensibilidad para caracterizar la vulnerabilidad de cada uno de los elementos de valor del

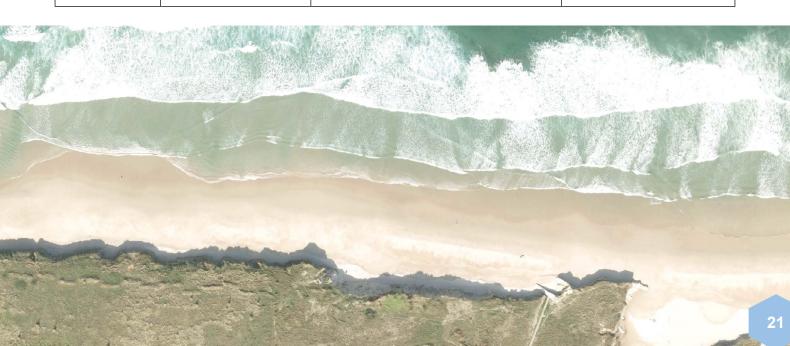
<sup>16</sup> Adaptado de IPCC, 2019: Annex I: Glossary [Weyer, N.M. (ed.)]. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In Press



sistema costero (véase Tabla 4) para, finalmente, asignar un nivel de vulnerabilidad a cada Unidad de Gestión, con base en el establecimiento de una serie de umbrales para los indicadores de modo semejante al análisis de peligrosidad (véase sección 2.2).

**Tabla 4.** Ejemplo de indicadores de exposición y sensibilidad utilizados para caracterizar la vulnerabilidad de los elementos de valor del sistema costero de las *Estrategias Regionales* en Cádiz, Málaga y Almería.

Subsistema costero	Elemento de valor	Indicador de exposición	Indicador de sensibilidad
Medio humano	Población residente	Número de habitantes potencialmente afectados.	-
	Población visitante	Número de plazas hoteleras.	-
	Áreas naturales	Área de suelo natural en el trasdós de la playa.	Porcentaje de área con figura de protección (%).
Medio natural	Playas	Longitud de playa.	-
	Dunas	Longitud de dunas en el frente costero.	Ancho de la duna.
	Acantilados	Longitud total de acantilado.	Acantilado en erosión.
	Área urbana	Área de suelo urbano.	-
	Actividades económicas	Área de suelo agrícola, industrial, comercio y servicios.	-
Medio socioe- conómico	Ocupaciones del DPMT	Número de ocupaciones del DPMT.	Escenario de gestión.
	Frente costero construido	Longitud de frente costero construido.	Escenario de gestión.
	Abastecimiento y sa- neamiento	Número de aliviaderos, emisarios, vertidos, estaciones de bombeo y pozos. Número de EBAR, EDAM y EDAR. Longitud de red de saneamiento	Escenario de gestión.
Infraestructuras	Transporte, energía y comunicaciones	Longitud de infraestructuras y redes.	Escenario de gestión.
críticas	Industria	Nº de gaseoductos. Longitud de tomas de agua y otras instalaciones.	Escenario de gestión.
	Patrimonio	Longitud de elementos del patrimonio arqueológico e histórico. Longitud de elementos del patrimonio etnográfico y cultural.	Escenario de gestión.



### 2.3.2. Área expuesta

Como se ha mencionado anteriormente (véase sección 2.1.1), la **exposición** se refiere a la **presencia** de elementos de valor en lugares que pueden verse afectados por el peligro considerado, distinguiendo dos posibles tipos de exposición para cada elemento de valor (véase Tabla 5):

- Exposición directa: Cuando el daño potencial sobre el elemento se produce por efecto directo de la erosión (e.g., por la pérdida del terreno que sostiene el elemento o por golpeo directo del oleaje sobre el elemento).
- Exposición indirecta: Cuando el daño potencial sobre el elemento se produce a consecuencia de la erosión, pero de forma indirecta (e.g., perdidas económicas en el sector turístico por la desaparición de la playa).

**Tabla 5.** Tipo de exposición asociada a cada elemento de valor del sistema costero.

Subsistema costero	Elemento de valor	Tipo de exposición
Medio humano	<ul><li>Población residente</li><li>Población visitante</li></ul>	Indirecta
	Áreas naturales	Indirecta
Medio natural	<ul><li>Playas, incluyendo sus dunas</li><li>Aguas de transición</li><li>Acantilados</li></ul>	Directa
Medio socioeconómico	Área urbana     Actividades económicas	Indirecta
	Ocupaciones del DPMT     Frente costero construido	Directa
Infraestructuras críticas	<ul> <li>Abastecimiento</li> <li>Saneamiento</li> <li>Transporte</li> <li>Comunicaciones</li> <li>Energía</li> <li>Industria</li> <li>Patrimonio</li> </ul>	Directa

Se asume que el área de exposición indirecta coincide con el área completa de la Unidad de Gestión. Sin embargo, no se puede asumir esta misma hipótesis en el caso de la exposición directa, ya que el relieve hace que gran parte de esta área quede alejada de los impactos directos del oleaje. Por tanto, se propone delimitar un área de exposición directa que comprende las siguientes áreas (véase Figura 9):

- La playa (sumergida y seca) hasta el frente costero (véase Figura 6), incluidos los sistemas dunares asociados a la playa.
- El DPMT en su totalidad, en virtud de su definición legal.
- El resto de la Unidad de Gestión hasta una cota umbral, que puede referirse a la cota de inundación máxima, la que se excede el caudal de rebase en que el oleaje causa daños estructurales en edificaciones (0,03 l/s/m)<sup>17</sup> u según otro criterio semejante.

<sup>17</sup> Coastal Engineering Manual – Part VI, Table VI-5-6.

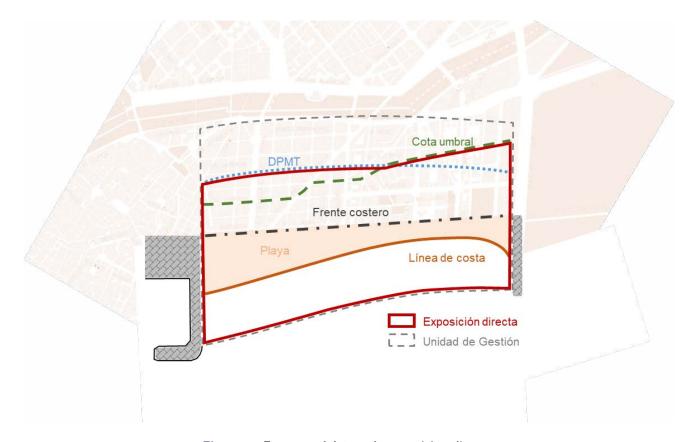


Figura 9. Esquema del área de exposición directa.

En resumen, de los elementos susceptibles de encontrarse bajo exposición directa (véase Tabla 5), solo deben considerarse expuestos aquellos que están efectivamente ubicados en esta área de exposición directa (véase Figura 9). Por otro lado, la toda población (permanente y visitante), las áreas naturales y urbanas, así como las actividades económicas que se localizan en la totalidad de la Unidad de Gestión deben considerarse expuestas a la erosión de forma indirecta.

### 2.4 Análisis del riesgo

Según la metodología propuesta, el riesgo resulta de la interacción dinámica entre la peligrosidad y la vulnerabilidad de los elementos de valor, que considera tanto su exposición como su susceptibilidad a verse afectados de forma negativa (i.e., su sensibilidad).

Una vez obtenidos los niveles de peligrosidad y vulnerabilidad de los elementos de valor del sistema costero, a continuación, se describe la metodología propuesta para combinarlos y obtener el nivel de riesgo desagregado para cada elemento de valor (véase sección 2.4.1). Finalmente, se detalla también el método propuesto para obtener los resultados de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo a nivel de subsistema costero y del sistema costero completo a partir de la agregación de los resultados desagregados (véase sección 2.4.2).

### 2.4.1. Riesgos desagregados

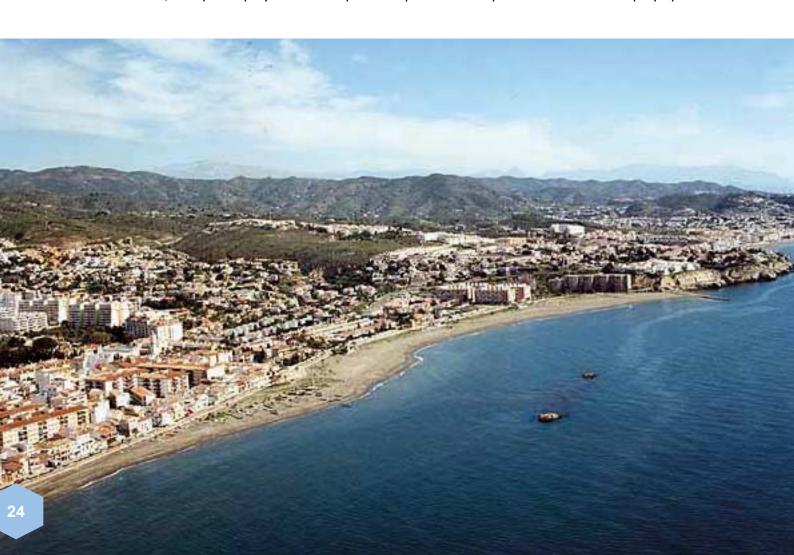
En primer lugar, se debe considerar que cada elemento de valor se ve afectado por un tipo específico de peligrosidad: erosión crónica o erosión por eventos, tal y como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 6. Tipo de peligrosidad y exposición asociada a cada elemento de valor del sistema costero.

Subsistema costero	Elemento de valor	Tipo de peligrosidad asociada	Tipo de exposición
Medio humano	<ul><li>Población residente</li><li>Población visitante</li></ul>	Erosión crónica	Indirectos
	<ul><li>Áreas naturales</li><li>Playas</li></ul>	Erosión crónica	Indirectos
Medio natural	<ul><li>Dunas</li><li>Aguas de transición</li><li>Acantilados</li></ul>	Eventos erosivos	Directos
	Área urbana     Actividades económicas	Erosión crónica	Indirectos
Medio socioeconómico	<ul><li>Ocupaciones del DPMT</li><li>Frente costero construido</li></ul>	Eventos erosivos	Directos
Infraestructuras críticas	<ul> <li>Abastecimiento</li> <li>Saneamiento</li> <li>Transporte</li> <li>Comunicaciones</li> <li>Energía</li> <li>Industria</li> <li>Patrimonio</li> </ul>	Eventos erosivos	Directos

Como se aprecia en la anterior tabla, todos los elementos que se encuentran bajo exposición indirecta se ven afectados por la erosión crónica y no por los eventos erosivos, ya que se encuentran fuera del alcance físico de estos.

Por otro lado, todos los elementos que se encuentran bajo exposición directa se ven afectados por los eventos erosivos, excepto la playa. Esta excepción responde a la capacidad natural de la playa para recu-



perarse en el corto o medio plazo (a escala mensual o estacional) tras un evento erosivo puntual. El resto de elementos bajo exposición indirecta se ven afectados únicamente por los eventos erosivos y no por la erosión crónica para evitar una doble contabilidad de los impactos, bajo la hipótesis de que cuando la erosión crónica alcanza al elemento expuesto, necesariamente éste ya ha sido alcanzado y dañado por algún evento erosivo puntual. Además, el indicador empleado para estimar la peligrosidad asociada a los eventos erosivos contiene información sobre la erosión crónica, puesto que los alcances del oleaje se superponen a la erosión de la playa en cada horizonte futuro y escenario considerado (véase sección 2.2.3).

Finalmente, el riesgo desagregado para cada elemento de valor se calcula empleando tanto el nivel de peligrosidad (véase sección 2.2) como el nivel de vulnerabilidad (véase sección 2.3) correspondiente. Así pues, se propone obtener el nivel de riesgo como promedio de los niveles de vulnerabilidad y peligrosidad (véase Tabla 7).

**Tabla 7.** Nivel de riesgo desagregado para cada elemento de valor del sistema costero en función de su nivel de peligrosidad y de vulnerabilidad.

Nivel de riesgo desagregado		Nivel de vulnerabilidad				
		Ninguno 0	Muy bajo 1	Bajo 2	Medio 3	Alto 5
	Ninguna	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno
	0	0	0	0	0	0
	Muy bajo	Ninguno	Muy bajo	Bajo	Bajo	Medio
	1	0	1	1,5	2	3
Nivel de peligrosidad	Bajo	Ninguno	Bajo	Bajo	Bajo	Medio
	2	0	1,5	2	2,5	3,5
	Medio	Ninguno	Bajo	Bajo	Medio	Medio
	3	0	2	2,5	3	4
	Alto	Ninguno	Medio	Medio	Medio	Alto
	5	0	3	3,5	4	5

### 2.4.2. Riesgos agregados

Los riegos desagregados para cada elemento de valor del sistema costero, así como su peligrosidad y vulnerabilidad, se obtienen en forma de niveles cualitativos (*i.e.*, alto, medio, bajo, muy bajo o ninguno) y, también, en forma cuantitativa a través del valor numérico asociado al nivel entre 0 (ninguno) y 5 (alto), lo cual permite agregar resultados por subsistemas costeros haciendo la media ponderada de acuerdo a pesos ( $\gamma$ ) establecidos en consenso con la DGCM según las siguientes fórmulas:

•	Medio humano:	P <sup>H</sup> =∑gP <sup>HI</sup> ;	V <sup>H</sup> =∑gV <sup>H</sup> ';	R <sup>H</sup> =∑γR <sup>HI</sup>	[1]
•	Medio natural:	P <sup>N</sup> =∑gP <sup>Ni</sup> ;	$V^{N}=\sum gV^{Ni};$	$R^{N} = \sum \gamma R^{Ni}$	[2]
•	Medio socioeconómico:	P <sup>s</sup> =∑gP <sup>si</sup> ;	V <sup>S</sup> =∑gV <sup>Si</sup> ;	$R^{S}=\sum \gamma R^{Si}$	[3]
•	Infraestructuras críticas:	P¹=∑gP¹i;	V¹=∑gV¹i;	R¹=∑γR¹i	[4]

### Donde:

- o "P", "V" y "R" se refieren a la peligrosidad, la vulnerabilidad y el riesgo, respectivamente.
- o Los superíndices "H", "N", "S" e "I" hacen referencia al medio humano, natural, socioeconómico y a las infraestructuras críticas, respectivamente.
- o El superíndice "i" hace referencia a los diversos elementos de valor de cada subsistema del sistema costero.

Finalmente, cabe señalar que el valor numérico resultante de las anteriores formulas se traduce a un nivel cualitativo de acuerdo a la siguiente tabla de equivalencia.

 Tabla 8. Equivalencia entre niveles cualitativos y sus valores numéricos.

Nivel cualitativo	Valor numérico	
Alto	>4 y ≤ 5	
Medio	>2,5 y ≤ 4	
Bajo	>1 y ≤2,5	
Muy bajo	> 0 y ≤1	
Ninguno	0	

Por último, los resultados de las fórmulas [1], [2], [3] y [4] permiten agregar resultados para todo el sistema costero haciendo la media ponderada de acuerdo a los pesos (G) establecidos también por la DGCM según las siguientes fórmulas:

• Sistema costero:

 $P=\sum G \cdot P^{j}; \qquad V=\sum G \cdot EV^{j};$ 

 $R = \sum G \cdot R^{j}$ 

[5]

### Donde:

- o "P", "V" y "R" se refieren a la peligrosidad, la vulnerabilidad y el riesgo, respectivamente.
- o El superíndice "j" hace referencia a los cuatro subsistemas del sistema costero (medio humano, medio natural, medio socioeconómico e infraestructuras críticas).

Al igual que en el caso de los resultados por subsistemas costeros, los valores numéricos resultantes de la fórmula [5], para la peligrosidad, exposición-vulnerabilidad y riesgo del sistema costero completo, se traducen a niveles cualitativos (i.e., alto, medio, bajo, muy bajo o ninguno) de acuerdo a la Tabla 8.

## 3. ANÁLISIS DEL RIESGO COMBINADO DE EROSIÓN E INUNDACIÓN COSTERA

A continuación, se describe la metodología propuesta para el análisis del riesgo combinado de erosión e inundación costera. Para ello se propone combinar los resultados de cada una de las componentes del riesgo de erosión costera, obtenidos según se describe en el Capítulo 2 de la presente guía, con los resultados del riesgo de inundación costera obtenidos de estudios previos.

Los resultados del riesgo de inundación costera se deben obtener de los informes de caracterización de la peligrosidad y el riesgo a nivel de las Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI) de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación de las Demarcaciones Hidrográficas correspondientes a la Unidad de Análisis, elaborados en el marco del ciclo de planificación vigente. Respecto al ciclo de planificación vigente en la actualidad, el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación establece en su artículo 21.3 que los planes de gestión del riesgo de inundación se revisarán y se actualizarán a más tardar el 22 de diciembre de 2021. Por ello, en coordinación con los planes hidrológicos de cuenca, durante el segundo trimestre de 2021 se inició el proceso de información pública de los documentos del segundo ciclo por un plazo de 3 meses desde su publicación. Simultáneamente se inició la consulta pública de los estudios ambientales estratégicos a los efectos de la evaluación ambiental de dichos planes. Durante 2022, en distintas fases, los planes han continuado con la tramitación regulada en el Real Decreto 903/2010. Actualmente, los diferentes planes se encuentran en sus fases finales de aprobación.

En la presente guía, para el análisis del riesgo de inundación costera y sus componentes (peligrosidad y vulnerabilidad), se toma como referencia la metodología descrita en el informe "Elaboración de herramientas informáticas para la gestión de los planes de gestión de los riesgos de inundación y reporting a la Comisión Europea" (Aquatec, diciembre de 2015), que fue empleada en la elaboración de las Estrategias Regionales en las Islas Baleares, Cádiz, Málaga y Almería.

Así pues, en primer lugar se describen los resultados disponibles de cada una de las componentes del riesgo de erosión y de inundación costera por separado (véase sección 3.1) y, a continuación, se detalla la metodología propuesta para la combinación de ambos riesgos a fin de obtener un riesgo combinado de erosión e inundación costera (véase sección 3.2).

### 3.1 Datos de partida

A continuación, se describe la información obtenida de los análisis previos y que se propone como datos de partida del análisis del riesgo combinado de erosión e inundación. En concreto se detallan los horizontes futuros y escenarios considerados (véase sección 3.1.1), las escalas geográficas de análisis (véase sección 3.1.2) y los resultados de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo disponibles en cada uno de estos estudios previos (véase sección 3.1.3).

### 3.1.1. Horizontes futuros y escenarios

El análisis de riesgos de erosión costera se realiza para un año de referencia correspondiente a la situación actual y, al menos, tres horizontes relativos al corto, medio y largo plazo, incluyendo diversos escenarios de cambio climático y de gestión de la costa. En el caso de la inundación costera, el análisis de riesgos se realiza únicamente para la situación actual y no contempla horizontes futuros.

Los criterios para concretar los horizontes futuros y escenarios que deben considerarse se detallan en la **Guía para el desarrollo de estrategias regionales para la protección de la costa**.

### 3.1.2. Escalas geográficas

En cuanto a la escala espacial, los resultados del análisis de la erosión costera se obtienen a nivel de cada una de las Unidades de Gestión en las que se divide la franja costera de la Unidad de Análisis, según la metodología descrita en la **Guía para el desarrollo de estrategias regionales para la protección de la costa**. Cada Unidad de Gestión corresponde a uno o más polígonos que encierran una superficie que incluye la Zona de Influencia (ZI) y el Dominio Público Marítimo Terrestre (DPMT) hasta la profundidad de cierre de la playa sumergida (véase Figura 10).

En el caso del riesgo de la inundación costera, el análisis se realiza a nivel de cada ARPSI, las cuales se extienden a lo largo de parte de la costa, comprendiendo solo aquellas zonas del territorio para las cuales se ha llegado a la conclusión de que existe un riesgo potencial significativo de inundación como resultado de los trabajos de Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI) realizados en el ámbito de cada Demarcación Hidrográfica<sup>18</sup>. Las ARPSI se definen mediante un polígono abierto que recorre longitudinalmente la costa sin una anchura especifica (véase Figura 10).

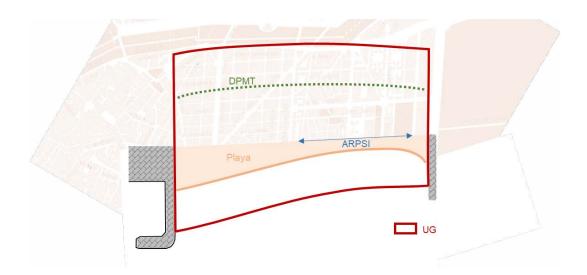


Figura 10. Ejemplo de Unidad de Gestión (UG) y Área de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI).

En el caso de la erosión costera, dentro las Unidades de Gestión se delimitan áreas con exposición directa, donde el daño potencial a los elementos que se encuentran en dicha área se produce por impacto directo de la erosión (*i.e.*, por la pérdida del terreno que sostiene el elemento o por golpeo directo del oleaje sobre el elemento). Estas áreas comprenden la playa hasta el frente costero, incluidos los sistemas dunares asociados a la playa, el DPMT en su totalidad, en virtud de su definición legal y el resto de la Unidad de Gestión hasta una cota umbral, definida como la cota de inundación máxima o en la que se excede el caudal de rebase en que el oleaje causa ciertos daños.

### 3.1.3. Resultados del riesgo y sus componentes

Tanto en el caso de la erosión como en el de la inundación costera, las componentes del riesgo (peligrosidad y vulnerabilidad) se expresan en términos de cinco clases asociadas a un valor numérico de 0 a 5 (véase Tabla 8 y Tabla 9), establecidos a partir de indicadores asociados a variables cuantitativas. En lo que se refiere a los resultados de riesgo, solo se obtiene un resultado semejante (en términos de clases asociadas a un valor numérico) para la erosión costera, mientras que el riesgo de inundación se expresa de forma cualitativa, como se detalla más adelante.

<sup>18</sup> En cumplimiento del artículo 5 del Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, que transpone la Directiva 2007/60/CE, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación.

**Tabla 9.** Ejemplo de escala de niveles de peligrosidad y vulnerabilidad de inundación costera de los datos de partida de la "Elaboración de herramientas informáticas para la gestión de los planes de gestión de los riesgos de inundación y reporting a la Comisión Europea" (Aquatec, diciembre de 2015).

Valoración / Grado de afección			
Muy grave 5			
Grave	3		
Moderado	2		
Leve	1		
Sin afección	0		

Los niveles de peligrosidad y vulnerabilidad de la inundación costera solo puede tomar valores enteros (véase Tabla 9), mientras que los valores de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo de erosión costera pueden tomar cualquier valor dentro de una horquilla para cada clase (véase Tabla 8). Sin embargo, la horquilla de cada clase en el caso de la erosión costera contiene el valor entero de la inundación costera para la misma clase. Por tanto, ambas clasificaciones pueden considerarse equivalentes en los dos estudios previos empleados como datos de partida.

Para determinar el nivel de **peligrosidad** de la erosión costera se tienen en cuenta indicadores propios de la erosión crónica (el ancho de la playa seca) y de la asociada a eventos (el porcentaje de oleajes que alcanzan el trasdós de la playa). En el caso de la inundación costera, el nivel de peligrosidad se obtiene a través de la superficie inundada y alcance de la inundación, el oleaje, las mareas, la erosión costera y los usos de baja permeabilidad del suelo.

Tanto para la erosión como para la inundación costera, la **vulnerabilidad** se entiende como la propensión o predisposición de los elementos expuestos a ser afectados negativamente. A pesar de que este concepto de vulnerabilidad es el mismo en los dos estudios previos usados como datos de partida (de erosión, por un lado, e inundación costera, por otro), los términos empleados para la vulnerabilidad en dichos estudios previos difieren, empleándose el término "riesgo" en el caso de la inundación. Al igual que en el caso de la peligrosidad, el nivel de vulnerabilidad se obtiene a partir de indicadores de exposición y sensibilidad de los elementos que podrían verse afectados por la erosión o la inundación. En el caso de la erosión costera, los elementos expuestos del sistema costero se organizan en cuatro subsistemas: medio humano, medio natural, medio socioeconómico e infraestructuras críticas. De forma equivalente, en el caso de la inundación costera, se consideran cuatro elementos expuestos (población, áreas de importancia medioambiental, actividades económicas afectadas y puntos de especial importancia), cada uno de los cuales puede asociarse a uno de los cuatro subsistemas considerados.

Tanto en el caso de la erosión como en el caso de la inundación costera, el **riesgo** se obtiene a través de la interacción dinámica de la peligrosidad y la vulnerabilidad. En el caso de la erosión costera, el nivel de riesgo de cada Unidad de Gestión se estima como el promedio de los niveles de sus componentes (peligrosidad y vulnerabilidad), resultando un nivel numérico basado en las cinco clases de la Tabla 9, tal y como se muestra en la Tabla 7.

Sin embargo, en el caso de la inundación costera, de los estudios previos empleados como datos de partida, no se obtiene un nivel numérico de la interacción de las componentes del riesgo, sino que cada ARPSI se caracteriza de forma enteramente cualitativa en función de los cuatro cuadrantes de un gráfico de doble entrada (véase Figura 11).

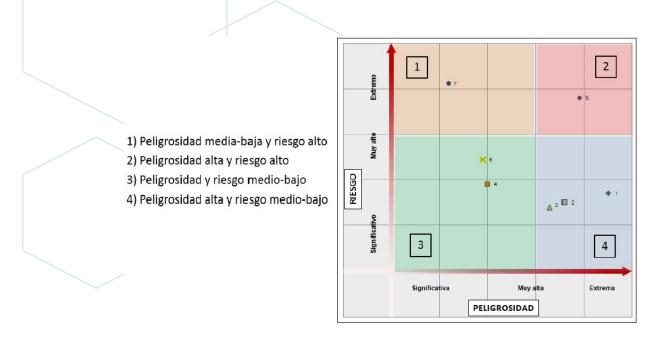


Figura 11. Diagrama de caracterización de ARPSI de la "Elaboración de herramientas informáticas para la gestión de los planes de gestión de los riesgos de inundación y reporting a la Comisión Europea" (Aquatec, diciembre de 2015).

Finalmente, tanto para la erosión como para la inundación costera, los resultados obtenidos, desagregados por elemento, se agregan para proporcionar resultados relativos al conjunto del sistema costero.

En el caso de la erosión costera, en primer lugar, los resultados de riesgo asociados a cada subsistema costero (medio humano, natural, socioeconómico e infraestructuras críticas) se obtienen como media ponderada de los resultados sobre cada elemento de valor (véase sección 2.4.2) y se procede de igual modo para obtener los resultados agregados de las componentes del riesgo: peligrosidad y vulnerabilidad de la erosión costera.

En el caso de la inundación costera, los resultados de peligrosidad relativa al conjunto del sistema costero se obtienen como media ponderada de la peligrosidad asociada a cada uno de las características a valorar según los pesos mostrados en la Tabla 10 y los resultados de vulnerabilidad se obtienen de igual modo empleando los pesos mostrados en la Tabla 11.

**Tabla 10.** Ejemplo de pesos asociados a los indicadores de peligrosidad de la "Elaboración de herramientas informáticas para la gestión de los planes de gestión de los riesgos de inundación y reporting a la Comisión Europea" (Aquatec, diciembre de 2015).

Características a valorar	Peso
Superficie inundada	0,3
Calados por mareas	0,1
Afección inundación por oleaje	0,3
Erosión en la costa	0,2
Usos de baja permeabilidad	0,1

**Tabla 11.** Ejemplo de pesos asociados a los elementos de valor del sistema costero de la "Elaboración de herramientas informáticas para la gestión de los planes de gestión de los riesgos de inundación y reporting a la Comisión Europea" (Aquatec, diciembre de 2015).

Características a valorar	Peso
Población afectada	0,3
Actividad económica Superficies	0,3
Puntos de importancia	0,2
Áreas importancia ambiental	0,2

### 3.2 Metodología

Los datos de partida empleados en la metodología aquí descrita se extraen de los resultados de los estudios previos detallados en la sección 3.1 y son los siguientes:

- Niveles numéricos (de 0 a 5) de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo de erosión costera relativos al
  conjunto del sistema costero, así como relativos a los cuatro subsistemas en que se divide: medio
  humano, natural, socioeconómico e infraestructuras críticas; en cada Unidad de Gestión, para la
  situación actual y los horizontes futuros considerados en el corto, medio y largo plazo bajo diversos
  escenarios de cambio climático y gestión.
- Niveles numéricos (de 0 a 5) de peligrosidad de inundación costera para el conjunto del sistema costero; en cada ARPSI y para la situación actual.
- Niveles numéricos (de 0 a 5) de vulnerabilidad relativa a la inundación costera sobre cada una de las siguientes características: población afectada, actividades económicas, puntos de especial importancia y áreas de importancia ambiental; en cada ARPSI y para la situación actual.

A partir de estos datos, la metodología propuesta se compone de los siguientes tres pasos para la obtención del riesgo combinado de erosión e inundación:

- 1. Caracterización del riesgo de inundación en términos equivalentes a los resultados disponibles de riesgo de erosión costera. Para lo cual es necesario estimar un nivel numérico del riesgo de inundación costera en cada ARPSI (véase sección 3.2.1).
- 2. Armonización de escenarios (véase sección 3.2.2) y escalas (véase sección 3.2.3) entre los resultados del riesgo de erosión costera y los de inundación costera.
- 3. Combinación de los riesgos de erosión e inundación costera. Para lo cual se propone una formulación algebraica que permite dar distinto peso a ambos riesgos (véase sección 3.2.4).

La aplicación de esta metodología permite caracterizar el riesgo combinado de erosión e inundación, así como sus componentes (peligrosidad y vulnerabilidad) a nivel del medio humano, natural, socioeconómico, infraestructuras críticas y para el conjunto del sistema costero en las Unidades de Gestión, en la situación actual y en los horizontes futuros (corto, medio y largo plazo).

### 3.2.1. Caracterización del riesgo de inundación con base en un nivel numérico

A la vista de los resultados disponibles en los estudios previos, (véase sección 3.1), para obtener un riesgo de inundación equivalente al riesgo de erosión disponible, es necesario expresar con base en un nivel numérico (de 0 a 5) el riesgo de inundación relativos al conjunto del sistema costero y a cada uno de los cuatro subsistemas en que se divide: medio humano, medio natural, medio socio-económico e infraestructuras críticas.

Para ello, en primer lugar, los niveles de vulnerabilidad frente a la inundación costera relativos a cada uno de los cuatro subsistemas se extraen directamente de los niveles de vulnerabilidad disponibles para la población afectada (medio humano), las áreas de importancia medioambiental (medio natural), las actividades económicas (medio socioeconómico) y los puntos de especial importancia (infraestructuras críticas).

A continuación, el nivel de riesgo de inundación costera se obtiene como promedio de los niveles de sus componentes (peligrosidad y vulnerabilidad), al igual que en el caso del riesgo de erosión costera (véase sección 2.4.1). El nivel de peligrosidad empleado para ello es el relativo al conjunto del sistema costero, mientras que el nivel de vulnerabilidad es el correspondiente a cada uno de los cuatro subsistemas.

Finalmente, los resultados de riesgo de inundación costera sobre cada uno de los cuatro subsistemas se agregan haciendo su media ponderada de acuerdo a los pesos establecidos en el caso de la erosión costera (véase sección 2.4.2).

De este modo, cada Unidad de Gestión queda caracterizada por un nivel (de 0 a 5) de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo de erosión costera y cada ARPSI queda caracterizada por niveles equivalentes (de 0 a 5) de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo de inundación costera, tanto relativos al conjunto del sistema costero como asociados a los cuatro subsistemas en que se divide: medio humano, medio natural, medio socio-económico e infraestructuras críticas.

### 3.2.2. Armonización de horizontes futuros y escenarios

En lo referente a la escala temporal, se dispone de resultados del riesgo de erosión para diversos horizontes futuros y escenarios. Sin embargo, en el caso de la inundación costera solo se dispone de información relativa a la situación actual.

El riesgo de erosión e inundación combinado en los diversos horizontes futuros considerados se estima adoptando el incremento de riesgo estimado exclusivamente para la erosión costera como una aproximación del incremento del riesgo de erosión e inundación combinado:

$$R_{FI}^{j} = R_{FI}^{o} + DR_{F}^{o \rightarrow j}$$
 [6]

Donde:

- R<sub>EI</sub> es el riesgo de erosión e inundación combinado en el horizonte "j" de corto plazo, medio plazo o largo plazo o en la situación actual (si j=o).
- DR<sub>E</sub> °→j es el incremento entre el riesgo de erosión en la situación actual y en el horizonte futuro correspondiente.

De este modo, a partir de los resultados de  $R_{\rm E}$  en todos los horizontes futuros y escenarios (incluida la situación actual) y el resultado de  $R_{\rm EI}$  en la situación actual, se obtienen los resultados de  $R_{\rm EI}$  en cada horizonte futuro.

### 3.2.3. Armonización de escalas geográficas

En cuanto a la escala geográfica del riesgo combinado de erosión e inundación, el análisis se debe realizar a nivel de cada Unidad de Gestión en las que se ha dividido la franja costera. Para ello, en aquellas Unidades de Gestión en las que no se localiza ninguna ARPSI, se asume que no hay afección por riesgo de inundación y, en el caso de que una ARPSI ocupe solo parcialmente la Unidad de Gestión, el riesgo de inundación queda minorado en proporción a la fracción de longitud de costa que ocupa el ARPSI según el siguiente factor:

$$\gamma_{ARPSI} = L_{ARPSI} / L_{UG}$$
 [7]

### Donde:

- $\gamma_{ARPSI}$  = razón de escala geográfica de un ARPSI.
- L<sub>ARPSI</sub> = Longitud del ARPSI contenida en la Unidad de Gestión.
- $L_{UG}$  = Longitud de la Unidad de Gestión que contiene el ARPSI.

### 3.2.4. Combinación algebraica ponderada

Por último, se asume que la inundación costera añade impactos adicionales a los derivados de la erosión y se establece un peso relativo del 20% para el riesgo de inundación respecto del riesgo de erosión, Así, el riesgo combinado de erosión e inundación se obtiene para cada Unidad de Gestión según la siguiente fórmula:

$$R_{FI} = R_F + \gamma_I \sum_{i=1:N} \left[ \gamma_{ARPSI}^{i} \cdot R_{I,ARPSI}^{i} \right]$$
 [8]

### Donde:

- $R_{EI}$  = Riesgo combinado de erosión e inundación relativo a la Unidad de Gestión.
- R<sub>E</sub> = Riesgo de erosión de la Unidad de Gestión.
- $\gamma_i$  = peso relativo del riesgo de inundación respecto del riesgo de erosión (0.2).
- N = número de ARPSI contenidas en la Unidad de Gestión.
- $\gamma_{ARPSI}^{i}$  = razón de escala geográfica del ARPSI "i", según la fórmula [7].
- R<sub>I,ARPSI</sub> i = Riesgo de inundación del ARPSI "i".

Por tanto, según la metodología propuesta, el riesgo de inundación es un factor aditivo al riesgo de erosión. Es decir, el nivel de riesgo combinado tiene como mínimo el valor del riesgo de erosión, cuando no haya ninguna ARPSI en la Unidad de Gestión. Como máximo, puede aumentar una unidad cuando el ARPSI ocupe toda la extensión de la Unidad de Gestión y el nivel de riesgo de inundación costera sea máximo (igual a 5). Por lo tanto, es necesario añadir un nivel a la escala para valores mayores que 5, adicional a los niveles mostrados en la Tabla 8 (véase Tabla 12).

**Tabla 12.** Escala de niveles de riesgo combinado de erosión e inundación.

Nivel	Valor numérico
Muy alto	>5
Alto	>4 y ≤ 5
Medio	>2,5 y ≤ 4
Bajo	>1 y ≤2,5
Muy bajo	> 0 y ≤1
Ninguno	0

Finalmente, se emplea una fórmula idéntica a [8] para obtener la peligrosidad combinada y la vulnerabilidad combinada de erosión e inundación, así como los riesgos combinados sobre cada subsistema costero (medio humano, natural, socioeconómico e infraestructuras críticas).

En resumen, de la aplicación de la metodología descrita se obtienen los siguientes resultados de riesgo combinado de erosión e inundación:

 Niveles numéricos (de 0 a >5) de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo relativos al conjunto del sistema costero, así como relativos a los cuatro subsistemas en que se divide: medio humano, natural, socioeconómico e infraestructuras críticas; en cada Unidad de Gestión y para la situación actual, así como para los horizontes futuros y escenarios considerados.

### 4. CONCLUSIONES

En el presente documento se describe la metodología propuesta para el análisis del riesgo de erosión y de erosión e inundación combinada en el ámbito geográfico de una Unidad de Análisis (*i.e.*, provincia, comunidad o ciudad autónoma).

La batería de resultados que arrojan estos métodos y, en particular, su nivel de desagregación permitirá aportar información relevante para la elaboración de las *Estrategias Regionales* a diversos niveles:

- Estableciendo un nivel de riesgo de referencia (situación actual) para cada Unidad de Gestión (de ~1 km de longitud de costa).
- Cuantificando el aumento del nivel de riesgo en cada Unidad de Gestión bajo diversos horizontes futuros (corto, medio y largo plazo) y bajo diversos escenarios de cambio climático y de gestión.
- Caracterizando las causas tanto del nivel de riesgo actual como del aumento del nivel riesgo en el futuro:
  - Identificando los subsistemas del sistema costero que más contribuyen al nivel de riesgo.
  - Identificando los elementos de valor de cada subsistema costero que más contribuyen al nivel de riesgo.
  - Identificando las componentes del riesgo (peligrosidad y/o exposición-vulnerabilidad) que más contribuyen al nivel de riesgo.

Así pues, los resultados obtenidos de aplicar la metodología propuesta en esta guía para el análisis del riesgo de erosión e inundación costera posibilitan la toma de decisiones informadas en relación a las medidas a implementar para la gestión de estos riesgos a nivel regional (*i.e.*, en la Unidad de Análisis) y en cada Unidad de Gestión.

# Notas







