



IH cantabria
INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



**ASISTENCIA TÉCNICA A LA ELABORACIÓN DE UN ESTUDIO SOBRE LA
ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA COSTA DEL PRINCIPADO DE
ASTURIAS**

ACTIVIDAD 2: EVALUACIÓN DE IMPACTOS Y RIESGOS

La Actividad 2 “Evaluación de impactos y riesgos” recoge las Tareas 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6 que constan de la redacción de un estudio sobre la variabilidad climática y tendencias históricas de las dinámicas marinas e hidro-meteorológicas, el análisis histórico de la vulnerabilidad, la elaboración de un informe de proyecciones de cambio climático de dinámicas marinas e hidro-meteorológicas y una base de datos de alta resolución obtenida mediante técnicas avanzadas de downscaling estadístico, la caracterización de impactos del cambio climático en distintas unidades del litoral, la realización de un estudio sobre vulnerabilidad y riesgos del cambio climático en distintas unidades del litoral y la elaboración de un Atlas y Visor de Riesgos en la costa del Principado de Asturias, respectivamente.

Este documento pertenece al proyecto “Asistencia técnica a la elaboración de un estudio sobre la adaptación al Cambio Climático de la Costa del Principado de Asturias”, desarrollado por IHCantabria con el soporte técnico del Gobierno del Principado de Asturias y financiado por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Autores coordinadores del documento:

Iñigo J. Losada Rodríguez, Catedrático de la Universidad de Cantabria, Director de Investigación de IHCantabria.

Alexandra Toimil Silva, Investigadora de IHCantabria.

Pedro Díaz Simal, Profesor Titular de la Universidad de Cantabria, Investigador de IHCantabria.

Otros investigadores del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria “IHCantabria” participantes en el proyecto:

Sheila Abad Herrero, Jose Antonio Álvarez Antolínez, Paula Camus Braña, Sonia Castanedo Bárcena, Camino Fernández de la Hoz, Felipe Fernández Pérez, Cristina Galván Arbeiza, Cristina Izaguirre Lasa, Melisa Menéndez García, Pelayo Menéndez Fernández, Mirian Jiménez Tobio, Fernando J. Méndez Incera, Paula Núñez Pérez, Luis Pedraz Polo, Araceli Puente Trueba, Elvira Ramos Manzanos y Víctor Velarde Gutiérrez.





ÍNDICE



INDICE

TAREA 2.1: CARACTERIZACIÓN HISTÓRICA DE LAS DINÁMICAS MARINAS

1. INTRODUCCIÓN	1.1
2. DINÁMICAS Y VARIABLES DE ESTUDIO	1.2
2.1. Dinámicas relacionadas con inundación y erosión.....	1.2
2.2. Dinámicas relacionadas con los impactos sobre ecosistemas.....	1.6
3. METODOLOGÍAS	1.7
3.1. <i>Downscaling</i> estadístico basado en tipos de tiempo	1.7
3.1.1. Datos del predictor y predictando	1.8
3.1.2. Definición del predictor.....	1.8
3.1.3. Definición del modelo estadístico para el predictando	1.12
3.1.4. Cambios históricos en las probabilidades del predictor	1.12
3.2. Análisis estadístico de series temporales	1.13
4. RESULTADOS	1.14
4.1. Oleaje	1.14
4.2. Marea meteorológica	1.21
4.3. Indicador de la inundación: nivel total del agua (TWL)	1.25
4.4. Nivel medio del mar	1.28
4.5. Temperatura superficial del agua del mar	1.28
5. CONCLUSIONES	1.33
5.1. Dinámicas y variables de estudio	1.33
5.2. Metodologías	1.33
5.3. Resultados	1.34
6. REFERENCIAS	1.36

TAREA 2.2: ANÁLISIS HISTÓRICO DE LA VULNERABILIDAD

1. INTRODUCCIÓN	2.1
2. BASE DE DATOS.....	2.2
2.1. Población	2.2
2.2. Actividad económica	2.2
2.3. Renta disponible por habitante	2.3
2.4. Stock de capital	2.3
3. METODOLOGÍA	2.6
3.1. Exposición	2.6
3.2. Vulnerabilidad. Aplicación de funciones de daño	2.7
4. RESULTADOS	2.9
4.1. Población	2.9
4.2. Valor añadido bruto (vab)	2.9
4.3. Renta familiar disponible	2.9
4.4. Stock de capital	2.9

5. CONCLUSIONES	2.10
5.1. Bases de datos	2.10
5.2. Metodología	2.11
5.3. Resultados	2.12
6. REFERENCIAS	2.13
TAREA 2.3: PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO DE DINÁMICAS MARINAS	
1. INTRODUCCIÓN	3.1
2. METODOLOGÍA.....	3.2
2.1. Análisis de las dinámicas marinas.....	3.2
2.1.1. Oleaje y marea meteorológica.....	3.2
2.1.2. Temperatura superficial del agua.....	3.7
2.2. Análisis de las dinámicas hidrometeorológicas: precipitación y temperatura del aire	3.8
3. RESULTADOS.....	3.9
3.1. Proyecciones de dinámicas marinas	3.9
3.1.1. Oleaje	3.9
3.1.2. Marea meteorológica	3.14
3.1.3. Nivel medio del mar regional	3.16
3.1.4. Temperatura superficial del agua	3.17
3.2. Proyecciones de dinámicas hidrometeorológicas	3.24
3.2.1. Precipitación	3.24
3.2.2. Temperatura del aire	3.28
4. CONCLUSIONES	3.34
4.1. Metodología	3.34
4.2. Resultados	3.34
5. REFERENCIAS	3.36
TAREA 2.4: IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL LITORAL ASTURIANO	
1. INTRODUCCIÓN	4.1
2. ANÁLISIS DE UNIDADES DEL LITORAL	4.2
2.1. Identificación de impactos	4.2
2.2. Identificación de limitaciones	4.2
3. INUNDACIÓN	4.4
3.1. Introducción.....	4.4
3.2. Dinámicas generadoras de la inundación	4.4
3.3. Exposición	4.5
3.4. Modelado de la inundación	4.8
3.5. Metodología de inundación	4.11
3.5.1. Mallas de cómputo.....	4.11
3.5.2. Calibración de los inputs del modelo.....	4.14
3.5.3. Pruebas de sensibilidad	4.20
3.6. Escenarios de cambio climático	4.22
3.7. Resultados	4.24

4. EROSIÓN.....	4.35
4.1. Introducción.....	4.35
4.2. Dinámicas generadoras de la erosión	4.35
4.3. Exposición	4.46
4.4. Modelado de la erosión	4.47
4.4.1. Erosión debida al aumento del nivel del mar: Bruun	4.48
4.4.2. Erosión debida a oleaje y niveles: Miller y Dean	4.40
4.5. Escenarios de cambio climático	4.42
4.6. Resultados	4.43
4.6.1. Reconstrucción de las series temporales de erosión-acreción	4.43
4.6.2. Retroceso de la línea de costa debido al aumento del nivel del mar.....	4.50
4.6.3. Agregación de los efectos de corto plazo al aumento del nivel del mar ..	4.55
5. CAMBIOS MORFODINÁMICOS EN ESTUARIOS.....	4.95
5.1. Introducción.....	4.95
5.2. Estado del conocimiento.....	4.95
5.2.1. Modelos de equilibrio	4.95
5.2.2. Modelos de procesos.....	4.96
5.2.3. Requerimientos de los modelos	4.97
5.2.4. Conclusiones del estado del conocimiento	4.98
5.3. Objetivos	4.99
5.4. Descripción de los estuarios de estudio	4.99
5.4.1. Estuario del Eo.....	4.100
5.4.2. Estuario del Navia	4.100
5.4.3. Estuario del Nalón	4.101
5.4.4. Estuario de Avilés.....	4.101
5.4.5. Estuario de Villaviciosa.....	4.102
5.4.6. Estuario de Ribadesella	4.102
5.5. Metodología	4.103
5.6. Datos de partida	4.108
5.6.1. Batimetría	4.108
5.7. Efectos previsibles del cambio climático en los estuarios	4.112
5.7.1. Caracterización morfológica de los estuarios.....	4.113
5.7.2. Determinación de los coeficientes de proporcionalidad	4.118
5.7.3. Formulaciones empíricas. Efectos del cambio climático en estuarios....	4.120
6. CONCLUSIONES	4.129
6.1. Inundación.....	4.129
6.2. Erosión.....	4.130
6.3. Cambios morfodinámicos en estuarios.....	4.133
7. REFERENCIAS	4.135

TAREA 2.5: VULNERABILIDAD Y RIESGOS DERIVADOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL LITORAL ASTURIANO

1. INTRODUCCIÓN	5.1
2. METODOLOGÍA.....	5.2
3. RIESGO SOBRE EL SISTEMA SOCIOECONÓMICO.....	5.4
3.1. Caracterización de la vulnerabilidad	5.4
3.1.1. Población	5.4
3.1.2. Usos del suelo.....	5.5
3.1.3. Características físicas de las playas de estudio	5.6
3.1.4. Indicadores socioeconómicos	5.7
3.1.5. Valoración económica de servicios ecosistémicos.....	5.8
3.2. Escenarios considerados	5.10
3.3. Metodología de análisis	5.14
3.3.1. Análisis del riesgo de inundación.....	5.14
3.3.2. Análisis del riesgo de erosión	5.27
3.4. Resultados	5.32
3.4.1. Riesgo sobre la población	5.33
3.4.2. Riesgo sobre el sistema económico	5.38
3.4.3. Riesgo sobre el turismo	5.82
3.4.4. Identificación de subsistemas críticos afectados	5.102
4. RIESGO SOBRE EL SISTEMA NATURAL.....	5.107
4.1. Introducción.....	5.107
4.2. Peligros	5.108
4.2.1. Aumento del nivel medio del mar.....	5.108
4.2.2. Cambio de la temperatura superficial del agua.....	5.110
4.3. Impactos del aumento del nivel medio del mar sobre los ecosistemas.....	5.121
4.3.1. Exposición.....	5.122
4.3.2. Vulnerabilidad	5.130
4.3.3. Impacto	5.136
4.4. Impactos del aumento de la temperatura del mar sobre los ecosistemas....	5.147
4.4.1. Regiones biogeográficas	5.148
4.4.2. Distribución potencial de <i>Gelidium Corneum</i>	5.153
4.5. Limitaciones.....	5.173
5. CONCLUSIONES	5.175
5.1. Metodología	5.175
5.2. Riesgo sobre el sistema socioeconómico	5.175
5.3. Riesgo sobre el sistema natural.....	5.177
6. REFERENCIAS	5.179

TAREA 2.6: ATLAS Y VISOR DE RIESGOS

LISTA DE ACRÓNIMOS	6.1
GLOSARIO	6.2
1. INTRODUCCIÓN	6.4
2. PELIGROSIDAD	6.5
2.1. Dinámicas	6.5
2.2. Proyecciones	6.7
3. IMPACTOS	6.9
3.1. Inundación	6.9
3.2. Erosión en playas	6.11
3.3. Cambios morfológicos en estuarios	6.12
4. RIESGO	6.14
4.1. Riesgo sobre el sistema socioeconómico	6.14
4.2. Riesgo sobre el sistema natural	6.16
4.3. Riesgo integrado	6.17
5. TEMPORAL DE FEBRERO DE 2014	6.18
5.1. Análisis forense	6.18
5.2. Cómo afecta al aumento del nivel medio del mar a la frecuencia de los temporales marítimos	6.19
5.3. Campaña de campo	6.20
6. ACERCA DE LOS RESULTADOS	6.21
7. REFERENCIAS	6.22



TAREA 2.1:

CARACTERIZACIÓN HISTÓRICA DE LAS DINÁMICAS MARINAS



1. INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de esta tarea es caracterizar históricamente las dinámicas marinas que son forzadoras de los principales impactos costeros. Para ello se ha dispuesto de las bases de datos descritas en el informe de la Tarea 1.1 y se han utilizado dos tipos de metodologías: el análisis estadístico de series temporales para el caso de la temperatura superficial del agua del mar y una metodología basada en tipos de tiempo que permite relacionar los estados de la atmósfera con las variables marinas generadoras de los impactos de inundación y erosión. Así, se ha obtenido una caracterización de las dinámicas mostrando la variabilidad espacial y temporal y obteniendo los cambios en las variables a lo largo del siglo XX a partir de las tendencias de largo plazo.

En el Capítulo 2 se hace una breve descripción de las dinámicas y las variables consideradas para el estudio, así como las bases de datos utilizadas y una caracterización estadística descriptiva. En el Capítulo 3 se describen los dos tipos de metodologías utilizadas para el análisis de la variabilidad espacial y temporal de las dinámicas y por último, en el Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos para las variables de estudio.

2. DINÁMICAS Y VARIABLES DE ESTUDIO

Las variables analizadas en esta Tarea responden principalmente a las dinámicas marinas generadoras de impactos en la costa. El objetivo que se ha planteado ha sido, más que hacer un análisis generalizado y sistemático de todas las dinámicas y sus variables, llevar a cabo un estudio histórico de aquellas variables que intervienen en los principales impactos identificados en este estudio, que son inundación y erosión costera, y cambios en la temperatura superficial del agua del mar. Este análisis, más focalizado en las variables de interés, permite tener una visión más clara y directa de los cambios históricos en los impactos.

2.1. Dinámicas relacionadas con inundación y erosión

Tanto en inundación como en erosión, las dinámicas fundamentales que generan el impacto son el oleaje, la marea meteorológica y los cambios en el nivel medio del mar. Para poder caracterizar bien estas dinámicas a lo largo de la costa de Asturias, se han elegido más de 500 puntos en los que se dispone de información.

El análisis histórico del oleaje se ha llevado a cabo a partir de la base de datos DOW (Camus et al. 2013) descrita en el informe de la Tarea 1.1. Esta base de datos tiene la ventaja de proporcionar el oleaje ya propagado hasta la costa con una resolución espacial de 200 m en el período 1948-2014. Los datos son horarios y las variables disponibles son altura de ola significativa, período de pico y dirección media del oleaje.

Las variables sobre las que nos vamos a centrar para hacer la caracterización del oleaje son la altura de ola significativa (H_s), período de pico (T_p), dirección (Dir) Y altura de ola correspondiente al percentil del 95 % ($H_{95\%}$) que es un parámetro relacionado con la erosión costera. A modo de ejemplo, la figura 2.1 muestra la altura de ola máxima de los 60 años de estudio en cada punto de la costa analizado. Tal y como cabía esperar, las zonas de la costa orientadas al noroeste, y que por lo tanto están más expuestas a los oleajes más energéticos, presentan mayores alturas de ola (hasta 8.5 m en la zona de Avilés) que las partes de la costa más abrigadas, orientadas al noreste.

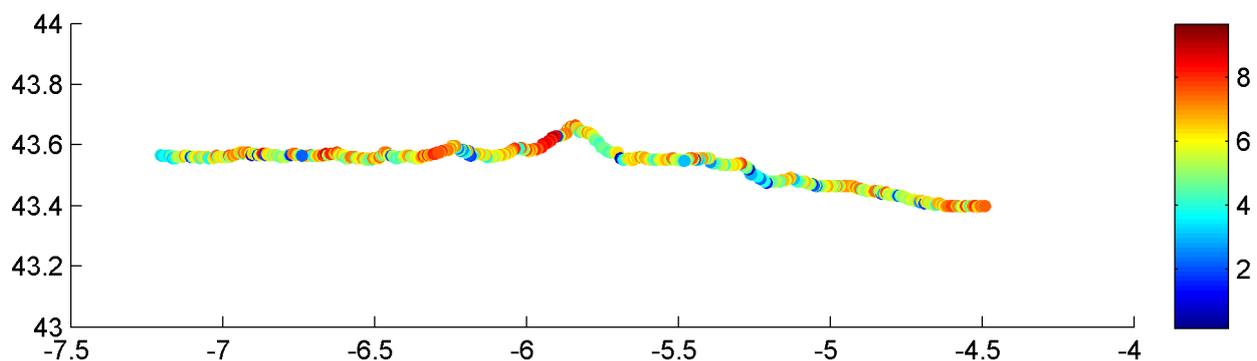


Figura 2.1. Altura de ola significativa máxima (m) en cada punto de estudio de la costa asturiana en el período 1948-2014.

El estudio de la marea meteorológica (MM) se ha hecho a partir de los datos de la base de datos GOS 1.1 (Cid et al. 2014). Esta base de datos proporciona series horarias de marea meteorológica en el período 1948-2014 en el sur de Europa, con una resolución horizontal de $1/8^\circ$ (en torno a 14 km). En este caso, la resolución espacial es más grosera que la del oleaje, por lo que a cada punto de estudio de la costa se ha asignado el valor de (MM) del nodo de la malla más próximo. En la figura 2.2 se muestra la marea meteorológica máxima de los 60 años de datos, y se puede apreciar como la variación en los puntos de oeste a este es muy pequeña, del orden de 0.04 m.

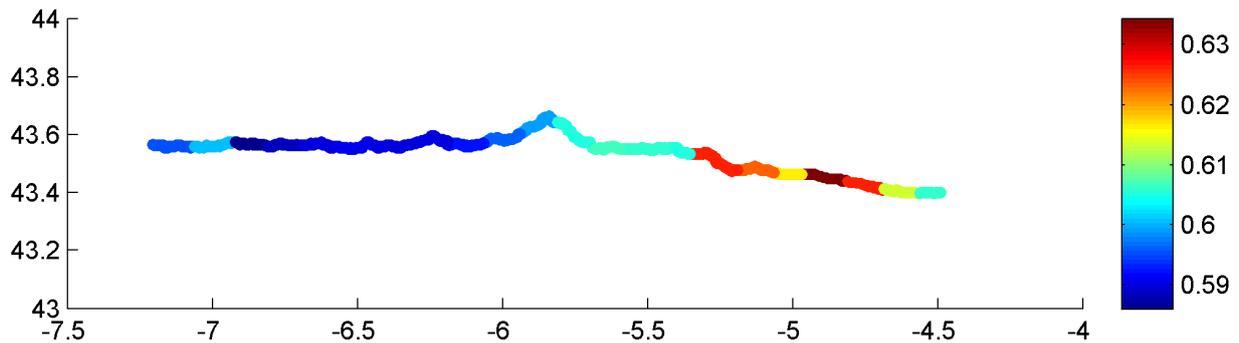


Figura 2.2. Marea meteorológica máxima (m) en cada punto de estudio de la costa asturiana en el período 1948-2014.

El nivel medio del mar, cuyo aumento debido al cambio climático es uno de los factores principales en los impactos de inundación y erosión, se va a estudiar a partir de los datos del mareógrafo de Gijón y de los datos procedentes de satélite de Church y White (2006).

Por último, aunque no es una variable aleatoria ni susceptible de cambio climático, la marea astronómica (MA) es uno de los factores que contribuye a la inundación costera, siendo en el Cantábrico un factor principal debido a su amplitud. Con el objetivo de tener información acerca de su amplitud y su variabilidad espacial a lo largo de la costa asturiana, en la figura 2.3 se muestra la amplitud máxima en cada punto de estudio obtenida a partir de la base de datos GOT (IH Cantabria).

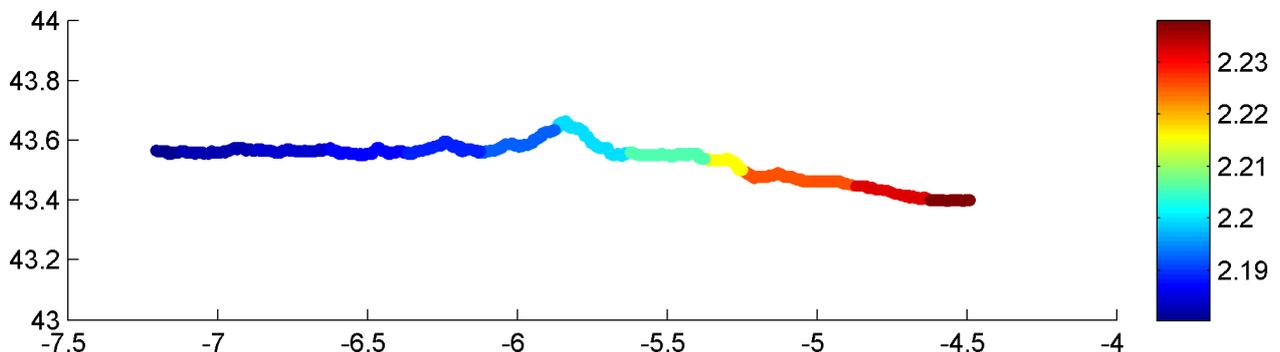


Figura 2.3. Amplitud máxima (m) de la marea astronómica en los puntos de estudio de la costa asturiana.

La combinación de las dinámicas marinas de oleaje (en términos de set up), marea astronómica y marea meteorológica, y la ocurrencia de eventos extremos de esta combinación dan lugar a la inundación costera. A partir de los datos de oleaje, MM y MA y utilizando la ecuación 2.1, hemos obtenido un indicador del nivel total (TWL de sus siglas en inglés) que nos permite caracterizar, desde el punto de vista de las dinámicas marinas, la inundación costera.

$$TWL = Su + MM + MA \quad (2.1)$$

Donde TWL es el nivel total, MM es la marea meteorológica, MA es la marea astronómica y Su es la contribución del oleaje en términos de set up. Una primera aproximación para el valor del set up es $Su=0.2 \cdot H_s$, pero en este caso, utilizando datos de campo procedentes de una campaña en la que se midieron manchas de inundación del temporal del 2 de Febrero de 2014 y un modelo de inundación de alta resolución, se ha ajustado una formulación algo más compleja:

$$Su = \alpha \cdot \sqrt{(H_s \cdot L_o)} \quad (2.2)$$

Donde $\alpha=0.04$ si el frente costero es una playa o $\alpha=0.08$ si es acantilado o puerto, es decir, un frente mucho más vertical y reflejante.

Utilizando esta formulación para el set up del oleaje, y la ecuación (2.1), hemos sido capaces de reconstruir las series temporales horarias de nivel del agua total (nuestro indicador de inundación) en cada punto de la costa. La figura 2.4 muestra una ventana temporal de 2 meses de la serie horaria de las distintas componentes del TWL y del TWL en Ribadesella, Villaviciosa, Avilés, Luarca y Vegadeo. En general se puede ver como los puntos al oeste del Cabo Peñas presentan mayores valores de altura de ola, set up y, por lo tanto, TWL. Hay que destacar también, que el punto de Luarca es el único en el que se ha considerado puerto como frente costero, apreciándose una mayor contribución del set up del oleaje en este punto.

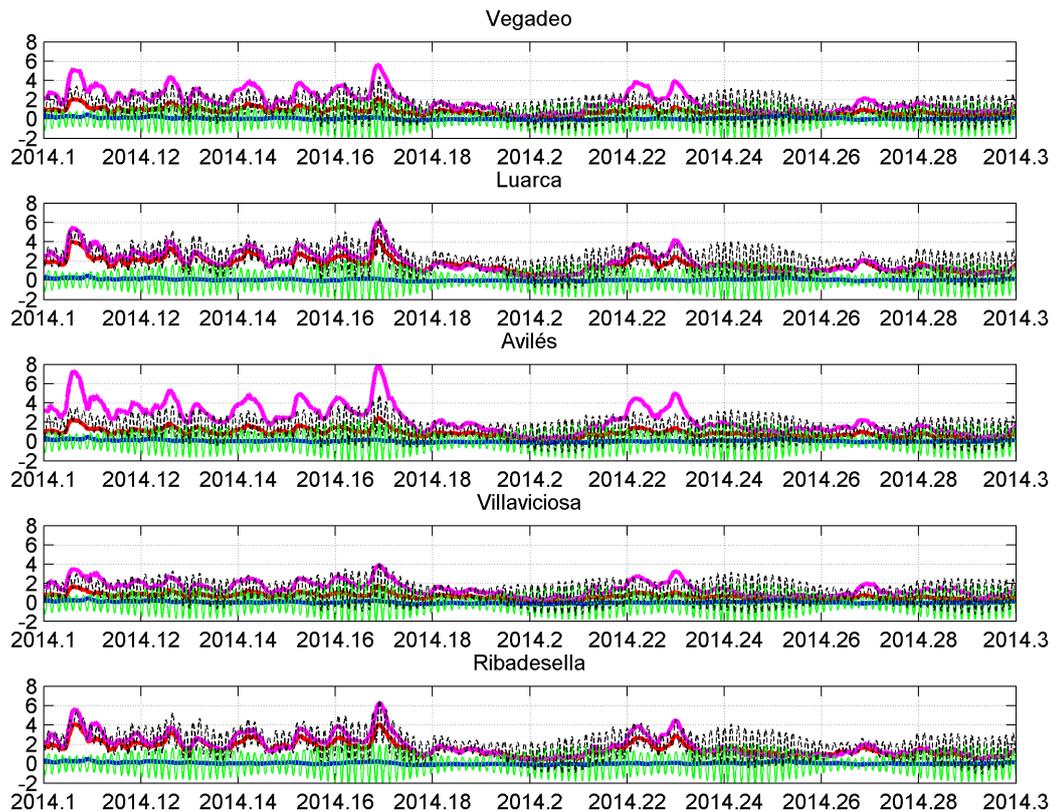


Figura 2.4. Serie temporal de las componentes del TWL (línea punteada negra): set up (línea roja), marea meteorológica (línea azul) y marea astronómica (línea verde). Además también se muestra la altura de ola significativa (línea rosa) para poder compararla con el set up.

De la serie temporal de TWL hemos obtenido algunos estadísticos como el TWL_{medio} o el $TWL_{\text{máximo}}$ que nos permiten caracterizar descriptivamente el TWL a lo largo de la costa asturiana y su variabilidad espacial (véase la figura 2.5). Este indicador de la inundación nos muestra una variación espacial que depende fundamentalmente de dos factores. En primer lugar, la zona occidental de Asturias presenta, en general, valores mayores del TWL que la zona oriental, que queda más abrigada por el Cabo Peñas de los mares más energéticos. En segundo lugar, el frente costero es también un factor determinante, puesto que la formulación empleada origina mayores valores de set up en las zonas de acantilado o puerto. De esta manera, hay zonas de la costa occidental como la playa de Salinas o San Juan de la Arena, que presentan menores valores de TWL que algunas zonas de la costa oriental (área de Lastres) donde el frente costero es fundamentalmente acantilado.

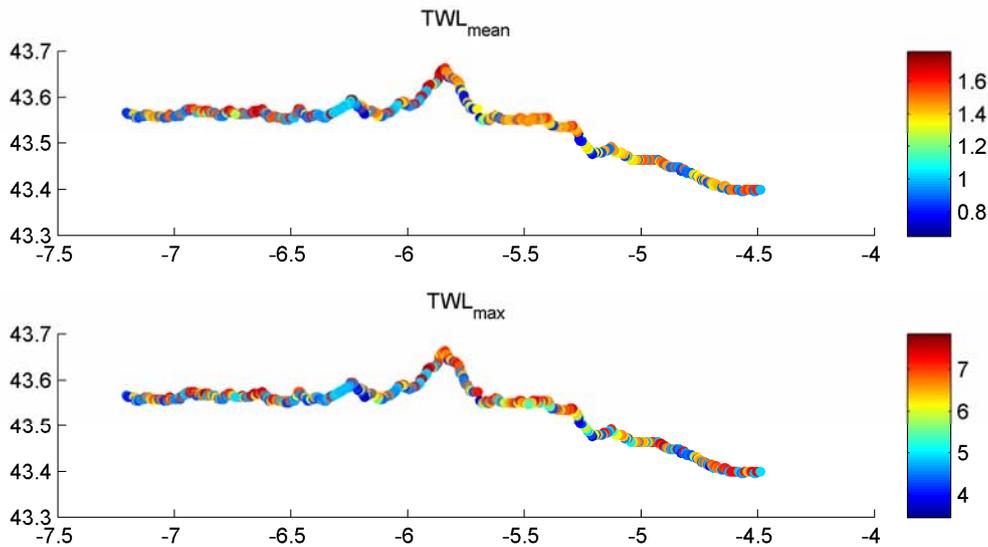


Figura 2.5. TWL medio y máximo en la costa asturiana.

2.2. Dinámicas relacionadas con los impactos sobre ecosistemas

La variable fundamental en la que nos vamos a centrar en este caso es la temperatura superficial del agua del mar, cuyos cambios producen impactos sobre los ecosistemas marinos y costeros. Si bien la inundación y la erosión son impactos que también afectan a los ecosistemas, los cambios en la temperatura superficial del agua del mar son un indicador directo de las pérdidas de especies y hábitats asociadas al cambio climático.

La base de datos analizada es el producto OSTIA que proporciona series diarias de variación de temperatura del agua en los últimos 30 años (1985-2013) en todo el mundo, con una resolución espacial de 4 km. A modo de ejemplo se muestra en la figura 2.6 la temperatura media diaria del 6 de Febrero de 1985 en el Golfo de Vizcaya.

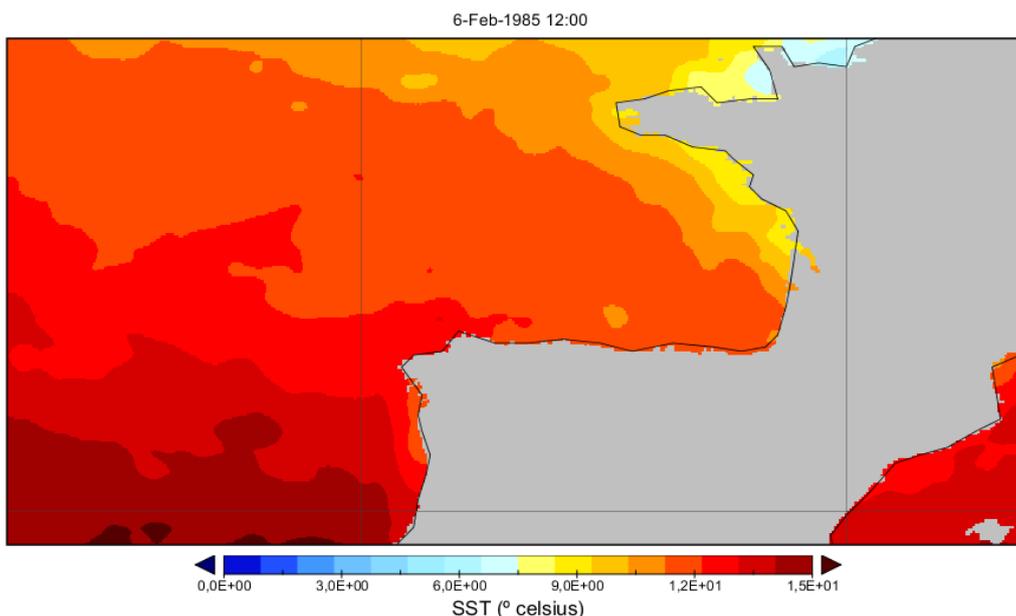


Figura 2.6. Temperatura media diaria del 6 de Febrero de 1985 en el Golfo de Vizcaya.

3. METODOLOGÍAS

La caracterización histórica de las dinámicas se ha llevado a cabo siguiendo dos tipos de metodologías diferentes.

En el caso de las dinámicas marinas oleaje y marea meteorológica se ha optado por utilizar una metodología novedosa de *downscaling* estadístico basada en tipos de tiempo (Camus et al. 2014). La naturaleza de estas dinámicas hace que su generación se derive de la situación de la atmósfera (en términos de viento y presión atmosférica como variables generadoras), de manera que, estudiando los estados de ésta y sus cambios, podemos inferir los cambios en el oleaje y la marea meteorológica. Además, esta metodología nos va a permitir proyectar al futuro los cambios en estas dinámicas bajo distintos escenarios de cambio climático.

En el caso de la temperatura superficial del agua del mar y el nivel medio del mar, se ha optado por utilizar análisis de series temporales mediante modelos estadísticos más o menos sofisticados. Este análisis nos ha permitido obtener las variaciones estacionales, interanuales y la tendencia de largo plazo de la variable de estudio.

3.1. *Downscaling* estadístico basado en tipos de tiempo

La climatología sinóptica, o lo que aquí llamamos tipos de tiempo, es un campo muy utilizado y desarrollado en los últimos años en climatología para entender diferentes variables geofísicas. De esta manera, se han desarrollado numerosas técnicas estadísticas para relacionar patrones de circulación de gran escala con la respuesta de variables geofísicas locales, tales como temperatura o precipitación. Siguiendo la metodología de Camus et al. (2014), en este estudio vamos a utilizar este tipo de técnicas para relacionar los patrones atmosféricos de gran escala con la respuesta marina local en forma de oleaje y marea meteorológica.

Los pasos de la metodología, que se describen con más detalle a continuación, son los siguientes:

1. Recolección histórica de datos del predictor y del predictando: donde llamamos predictor a la variable atmosférica (campos de presión a nivel del mar) que genera la respuesta marina y predictando a esa respuesta en forma de dinámicas (oleaje y marea meteorológica).
2. Definición del predictor basada en las características de generación del oleaje local utilizando el método ESTELA (Pérez et al. 2014).
3. Definición del modelo estadístico para el predictando basado en tipos de tiempo.
4. Análisis de los cambios en las probabilidades del predictor a lo largo del siglo XX y estimación de los cambios históricos en el predictando (dinámicas marinas).

3.1.1. Datos del predictor y predictando

Como ya se ha explicado, el predictor es la variable atmosférica de gran escala que genera la respuesta marina en forma de dinámicas locales (predictando). Los datos utilizados para definir el predictor son los campos de presión a nivel del mar de la base de datos CFSR, con resolución espacial de 0.5° y resolución temporal horaria en el período 1979-2010 (esta base de datos es descrita más ampliamente en el informe de la Tarea 1.1). Esta base de datos se ha elegido por ser la de mejor calidad y, por tanto, representar mejor los estados de la atmósfera. Sin embargo, para estudiar los cambios históricos en el predictor (es decir, la tendencia de largo plazo que luego servirá para estudiar los cambios en las dinámicas), se ha elegido la base de datos 20CR por cubrir todo el siglo XX y, por lo tanto, poder extraer esta información adecuadamente.

En cuanto al predictando, se va a trabajar con dos: oleaje y marea meteorológica. Tal y como se ha descrito previamente en este informe, para el oleaje se ha utilizado la base de datos DOW (más de 60 años de series horarias de oleaje propagado hasta la costa) y para la marea meteorológica la base de datos GOS, ambas desarrolladas y validadas en IH Cantabria.

3.1.2. Definición del predictor

Un paso muy importante en esta metodología es la definición adecuada del área del predictor. Dependiendo del lugar en el que queramos estudiar el oleaje, la definición de los campos de presión que lo generan será una u otra. El oleaje que llega a las costas asturianas no tiene la misma naturaleza ni se ha generado en el mismo sitio que el oleaje que llega a las costas catalanas, o al Golfo de Cádiz, por ejemplo. Por lo tanto, es necesario conocer cómo y dónde se ha generado el oleaje que llega al punto de estudio. Para ello vamos a utilizar el método ESTELA (Evaluating the Source and Travel-time of the wave Energy reaching a Local Area, Pérez et al. 2014) que permite caracterizar la energía del oleaje y su tiempo de viaje desde el área de generación hasta el punto de estudio.

Para poder aplicar el método ESTELA es necesario conocer la energía del oleaje en todas sus direcciones y frecuencias, es decir, el espectro bidimensional de oleaje. Esta información es proporcionada por la base de datos global de Rasche et al. (2008) y Rasche and Arduin (2012), la cual se ha utilizado en este paso de la metodología. Para caracterizar la energía del oleaje que llega a la costa asturiana y su tiempo de viaje se ha elegido un punto frente a la costa en el que se ha aplicado el método. Los pasos seguidos para obtener el área del predictor son los siguientes:

1. Se aplica un criterio geográfico para delimitar el dominio espacial basado en el hecho de que el oleaje viaja por los grandes círculos de la esfera terrestre, eliminando así aquellas zonas que quedan en sombra, bloqueadas por áreas de tierra.
2. Se reconstruye el espectro del oleaje a partir de cuatro parámetros (altura de ola significativa, período de pico, dirección media y dispersión direccional) de varias componentes del oleaje (un sea y cinco *swells*) proporcionando información en frecuencias y direcciones.

3. Se hace una evaluación de la energía que llega al punto objetivo. Para ello se aplica un criterio físico con el fin de tener en cuenta sólo la fracción de energía que llega al punto objetivo y que viaja a la velocidad de grupo. La energía efectiva es corregida por la disipación que sufre el oleaje durante la propagación.
4. Por último, se obtiene el área neta de generación y disipación del oleaje, transformando el flujo efectivo de energía en una malla en coordenadas polares centrada en el punto objetivo.

Aplicando este método a un punto frente a la costa asturiana se ha obtenido el área de generación del oleaje para esta localización representado en la figura 3.1. Las zonas coloreadas muestran el flujo efectivo de energía (kW/m°). Las líneas rojas muestran los grandes círculos correspondientes a 16 sectores direccionales y las líneas negras representan el tiempo de viaje de la energía del oleaje en días. Las zonas rojas y amarillas representan las regiones con mayor potencial energético del oleaje que llega al punto objetivo en Asturias, mientras que la energía efectiva que llega de las zonas en azul oscuro es despreciable.

Estos mapas del flujo de energía medio del oleaje revelan características importantes del mismo. Se puede observar como el oleaje que llega a la costa asturiana se genera en la zona noroeste del Océano Atlántico y tarda de 3 a 6 días en llegar. Esta información es la que se tiene en cuenta a la hora de definir el dominio espacial y la cobertura temporal del predictor en el método de *downscaling* estadístico.

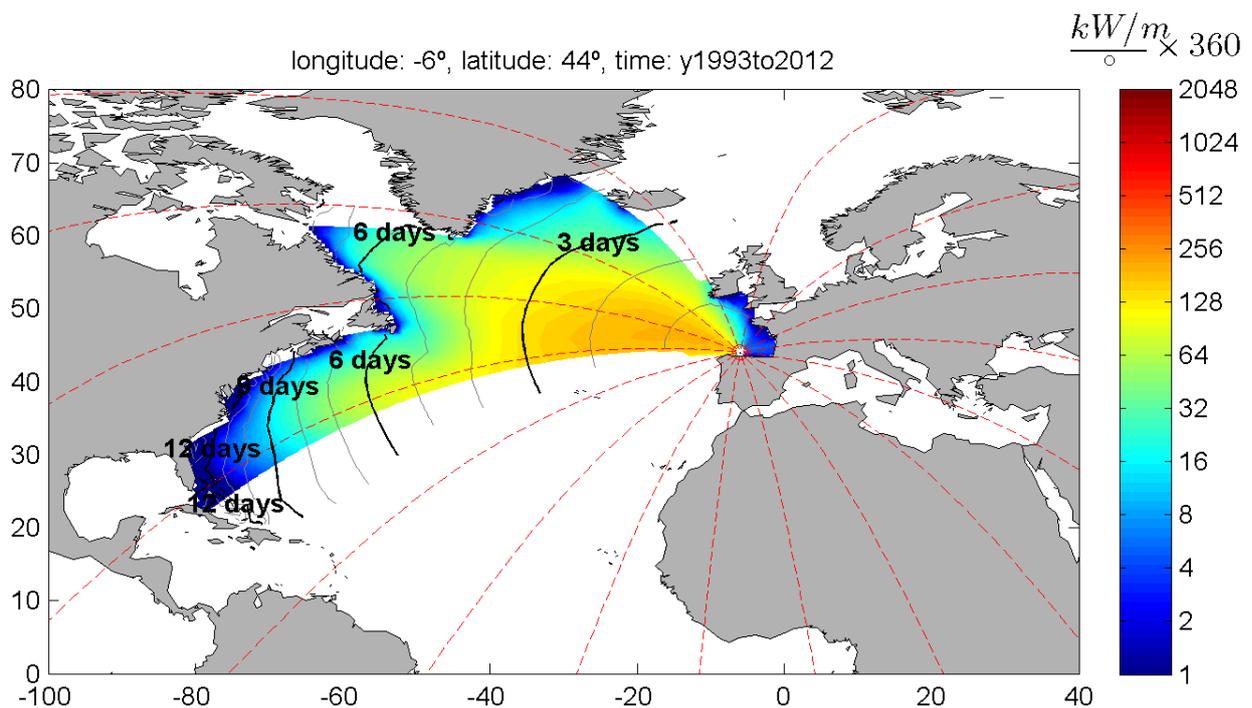


Figura 3.1. Flujo de energía medio efectivo en el período 1993-2013 para un punto del Cantábrico frente a la costa asturiana. Las zonas coloreadas están definidas por los puntos que cumplen el criterio geográfico del paso 1, mientras que el tiempo de viaje está representado por las líneas grises y negras.

Teniendo en cuenta el área de generación proporcionada por el método ESTELA, se ha escogido como área final para definir un predictor global de oleaje y marea meteorológica el área contenida en la zona 0°N-80°N y 80°W-50°E.

Las variables utilizadas del predictor para definir el modelo estadístico son los campos de presiones a nivel del mar y los gradientes de presión a nivel del mar al cuadrado, de manera que esta última variable está directamente relacionada con la energía del viento. Los puntos de tierra del dominio seleccionado se han ignorado, evitando así la gran variabilidad en el gradiente de presión sobre Groenlandia y otras zonas. El predictor se define como la presión media 3-diaria a nivel del mar y el gradiente medio 3-diario de presión, calculados diariamente. De esta manera, el predictor asociado a un determinado día corresponde a la media obtenida con ese día y los 2 previos.

Para realizar la clasificación del predictor en tipos de tiempo se utilizan una serie de técnicas estadísticas de minería de datos. En primer lugar, se aplican componentes principales (PCA) para reducir la dimensionalidad del problema y simplificar el proceso de clasificación. En segundo lugar, utilizando el número de componentes principales del predictor que representan el 95 % de la variabilidad de los datos en el espacio de los modos espaciales (EOFs), se hacen grupos utilizando el algoritmo k-medias.

La técnica de clasificación k-medias divide el conjunto de datos de partida en un determinado número de subconjuntos, definido cada uno de ellos por un prototipo, y formado cada uno de ellos por los datos para los cuales ese prototipo es el más cercano (Hastie et al., 2001). Una vez establecido el número de grupos e inicializados los prototipos (o centroides), en cada iteración se identifican los datos de entrada más próximos a cada centroide y se redefine el centroide como la media de esos datos más similares hasta minimizar la varianza total intra-grupos, es decir, que la suma de distancias entre los prototipos y los datos de entrada correspondientes a cada prototipo sea mínima. Para inicializar este método de clasificación se utiliza el algoritmo de máxima disimilitud (MDA), garantizando una clasificación determinista y el conjunto inicial más representativo. Finalmente, el conjunto obtenido el tipos de tiempo se organiza en una rejilla bidimensional, mediante un criterio de similitud, que permite una visualización intuitiva de la clasificación. Esta metodología y los métodos estadísticos utilizados están más ampliamente descritos en Camus et al. (2014).

La clasificación en tipos de tiempo obtenida para el predictor de Asturias se muestra en la figura 3.2, donde se representan las isobaras. Los sistemas de altas presiones sobre la presión media a nivel del mar (1013 Pa) se muestran en escala de rojos, mientras que las bajas presiones se muestran en escala de azules. Los patrones similares se muestran juntos variando suavemente de unas situaciones a otras. Además, los tipos de tiempo con sistemas de bajas presiones intensos pero diferente localización de su centro se sitúan en las esquinas de la rejilla, identificándose como diferentes patrones de circulación.

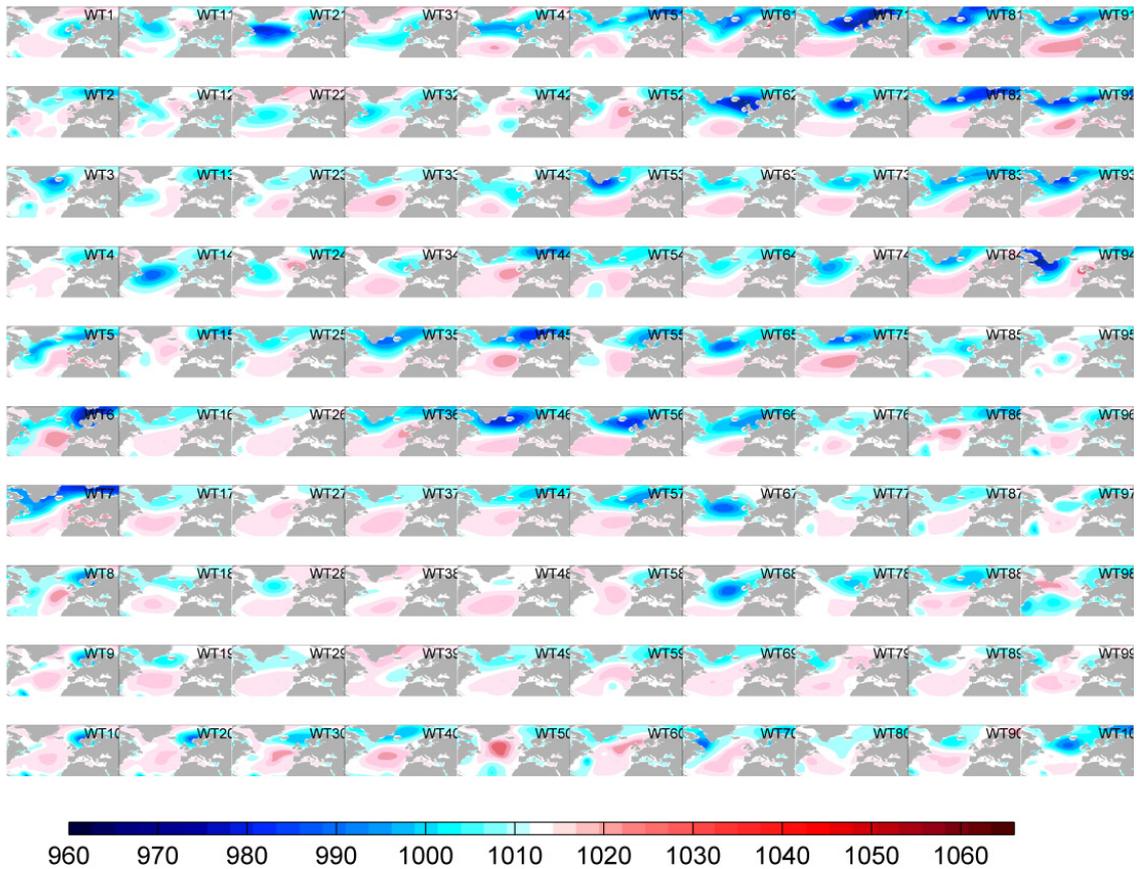


Figura 3.2. Representación de los 100 tipos de tiempo obtenidos para el predictor de Asturias.

La variabilidad estacional e interanual se puede analizar utilizando la clasificación de tipos de tiempo. La figura 3.3 muestra la probabilidad estacional de tipos de tiempo. Los colores azul oscuro indican tipos de tiempo con mayor frecuencia de aparición y los colores claros muestran los más inusuales. El otoño es la estación que presenta más variabilidad, es decir, donde mayor número de tipos de tiempo distintos ocurren, mientras que los patrones de verano son menos variables, situándose en la mitad baja de la rejilla y caracterizándose por sistemas de altas presiones.

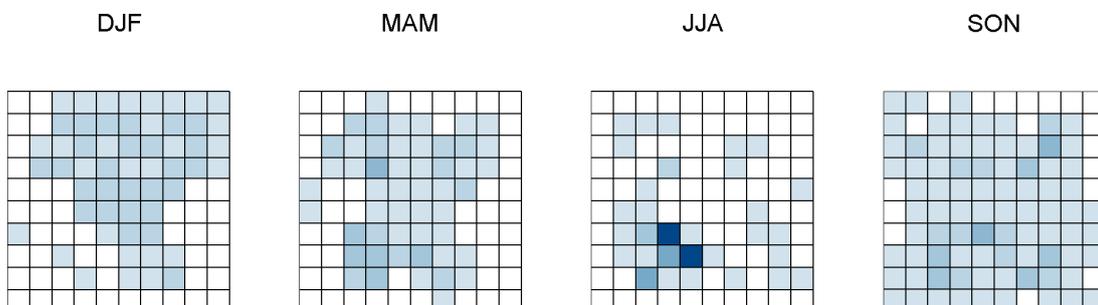


Figura 3.3. Probabilidad de ocurrencia estacional de los 100 tipos de tiempo mostrados en la figura 3.2.

3.1.3. Definición del modelo estadístico para el predictando

Una vez definida la clasificación de estados de la atmósfera en un conjunto de tipos de tiempo, el *downscaling* estadístico trata de asociar la distribución de diferentes parámetros de estados de mar o nivel de marea meteorológica a cada uno de esos tipos de tiempo. La relación estadística es, por tanto, definida durante las condiciones históricas y la distribución del predictando se asume que permanece constante. A partir de la suma de las distribuciones del predictando asociado a cada tipo de tiempo (por ejemplo, la distribución univariada de la altura de ola, $f_i(H)$) y la probabilidad del tipo de tiempo correspondiente, p_i) se puede obtener la distribución total del predictando (ecuación 3.1).

$$F(H) = \sum_{i=1}^{100} p_i \cdot f_i(H) \quad (3.1)$$

Calculando los cambios en las probabilidades de los tipos de tiempo para períodos futuros (p'_i), se pueden extrapolar las condiciones futuras del predictando.

$$F'(H) = \sum_{i=1}^{100} p'_i \cdot f_i(H) \quad (3.2)$$

3.1.4. Cambios históricos en las probabilidades del predictor

Utilizando los campos de presiones de la base de datos 20CR, se han obtenido los cambios en las probabilidades de ocurrencia de cada tipo de tiempo en los períodos 1880-1909, 1910-1939 y 1940-1969, con respecto al período de control 1979-2000. Para ello los campos de presiones medias 3 diarias son proyectados en el espacio de las funciones empíricas ortogonales, espacio en el que se ha realizado la clasificación. Cada situación diaria de presiones se asociada al tipo de tiempo más parecido. De esta manera, las presiones en un determinado periodo de tiempo quedan representadas en los 100 tipos de tiempo. La figura 3.4 muestra los cambios en las probabilidades de cada tipo de tiempo y para cada período de tiempo, referido siempre a las probabilidades del período de control estudiado (1979-2000). El aumento o disminución de probabilidad de determinados tipos de tiempo (representado en una escala de marrones o azules, respectivamente) significa que en el periodo más reciente (1979-2000) son más o menos frecuentes. Se puede ver como hay una serie de tipos de tiempo (principalmente los de invierno) que aumentan de probabilidad, mientras que hay otros (principalmente los representativos del verano) que disminuyen.

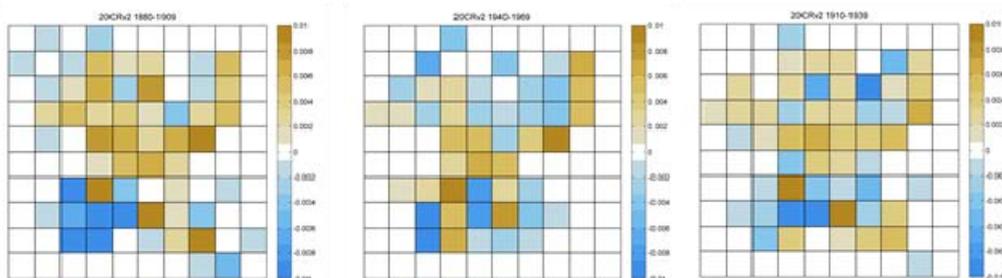


Figura 3.4. Cambios en las probabilidades de los tipos de tiempo en los períodos 1880-1909 (panel izquierdo), 1910-1939 (panel central) y 1940-1969 (panel derecho) con respecto al período de control 1979-2000.

Con esta información y el modelo estadístico establecido entre predictor y predictando se van a obtener los cambios históricos en las dinámicas marinas a lo largo del siglo XX.

3.2. Análisis estadístico de series temporales

Además de utilizar la climatología sinóptica para caracterizar y analizar las tendencias del oleaje y la marea meteorológica, también se van a utilizar las técnicas estadísticas tradicionalmente empleadas en el análisis de series temporales para analizar la temperatura superficial del agua del mar, el nivel medio del mar y hacer una caracterización complementaria del nivel total de inundación (TWL).

En el análisis de series temporales debemos distinguir entre el análisis del régimen medio (todo el conjunto de datos de la serie) y el análisis del régimen extremal (sólo aquellos valores excepcionales que superan un cierto umbral o suponen el valor máximo del año, etc).

En el análisis del régimen medio, se utilizan diversas técnicas para el procesado de los datos, como el cálculo de anomalías (variaciones alrededor de la media) o la estandarización. Una vez que los datos están en el formato adecuado se pueden analizar las variaciones estacionales, interanuales o la tendencia de largo plazo ajustando a la serie diferentes covariables que representen estas variaciones (ondas sinusoidales, covariables relacionadas con índices climáticos o un término lineal o exponencial de largo plazo).

En el análisis del régimen extremal el primer punto es la selección de los eventos de interés. En este estudio se ha optado por el método de excedencias sobre un umbral para seleccionar aquellos valores extremos que superan un determinado valor umbral elegido. Una vez seleccionada la población de datos se utiliza la teoría de valores extremos para ajustar el régimen extremal. El modelo combinado Pareto-Poisson permite modelar conjuntamente la intensidad del evento (Pareto) y su frecuencia (Poisson) y la relación biunívoca de sus parámetros con los de la función Generalizada de Extremos (GEV) facilita el modelado ajustando este conjunto de funciones.

4. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la caracterización de las dinámicas marinas. Se presenta inicialmente la caracterización del oleaje y marea meteorológica mediante el *downscaling* estadístico de tipos de tiempo y a continuación la caracterización del TWL combinando esta metodología con las técnicas tradicionales de análisis de series temporales. Por último, se muestra el análisis del nivel medio del mar y de la temperatura superficial del agua del mar.

4.1. Oleaje

En cada uno de los 500 puntos de estudio a lo largo de la costa de Asturias se han “volcado” los parámetros del oleaje H_s , T_p y Dir en cada tipo de tiempo de la rejilla de la figura 3.8, obteniendo las correspondientes funciones de distribución (para cada punto y tipo de tiempo). Para cerciorarnos de que el modelo estadístico ajusta bien en cada punto, se ha hecho una validación, calibrando previamente el modelo en el período 1979-1999 y validándolo en el período 2000-2013. A partir del modelo ajustado en el período de calibración se ha hecho la predicción de los parámetros de oleaje en el período de validación y se han comparado con los datos del reanálisis histórico en ese período. La figura 4.1 muestra las series temporales estimadas por el modelo estadístico y las observaciones en el período de validación 2000-2013 para distintos parámetros del oleaje, junto con los diagramas de dispersión de los parámetros estimados frente a las observaciones. Como se puede ver, los resultados están agregados a la escala mensual. Tanto en las series temporales como en los diagramas de puntos se puede ver una gran correlación entre las estimaciones del modelo y las observaciones.

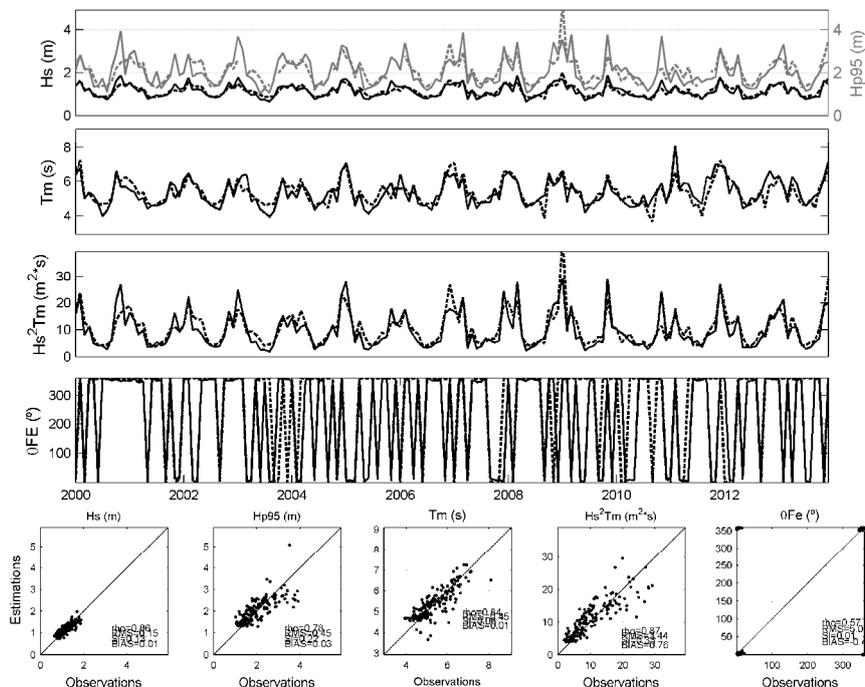


Figura 4.1. Validación del modelo estadístico basado en tipos de tiempo en un punto de la costa asturiana. Los paneles superiores muestran las series temporales estimadas por el modelo (línea discontinua) y observadas (línea continua) en el período 2000-2013 mientras que los paneles inferiores muestran los diagramas de dispersión de las estimaciones y las observaciones en ese período.

Una vez calibrado y validado el modelo, ajustamos de nuevo el modelo estadístico en todos los puntos de la costa considerando todo el período de CFSR (1979-2013) y obtenemos las relaciones estadísticas en cada punto. A modo de ejemplo, la figura 4.2 muestra la distribución estadística de altura de ola significativa en cada tipo de tiempo para un punto en Ribadesella. Se puede ver que hay tipos de tiempo, como el número 82 caracterizado por un sistema de bajas presiones en el norte de Europa, donde las alturas de ola alcanzan valores más altos, mientras que hay otros, como el número 37, típico de verano, donde las mayores probabilidades se concentran en las alturas de ola pequeñas. Cada una de estas funciones de distribución para cada tipo de tiempo representa la relación estadística que prevalece constante entre el predictor y el predictando.

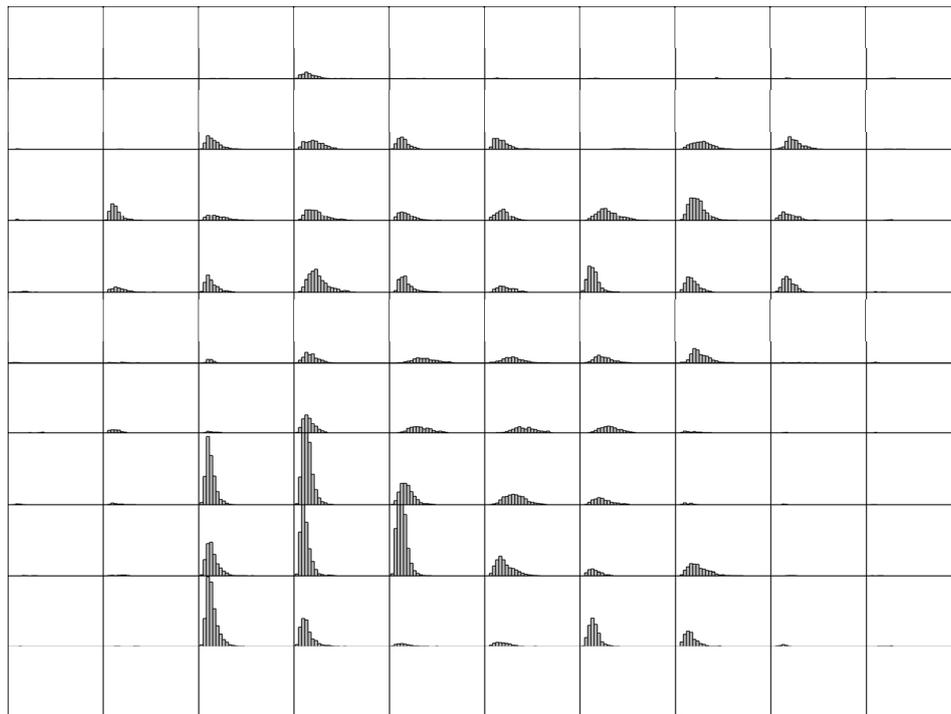


Figura 4.2. Distribución estadística de la altura de ola significativa (H_s) en Ribadesella en la clasificación de tipos de tiempo.

A partir de la distribución estadística en cada punto se pueden obtener distintos gráficos que nos proporcionan diferente información. Por ejemplo, en la figura 4.3 se muestra, en el panel izquierdo, la H_s media (m) para cada tipo de tiempo en Ribadesella y, en el panel derecho, la distribución de la altura de ola media y direcciones. De estos gráficos se puede extraer que los tipos de tiempo que generan mayor altura de ola son los tipos de tiempo 45, 56 y 62, ocurrentes principalmente en invierno y caracterizados por un sistema de bajas presiones sobre el norte de Europa (véase la figura 3.2). Los oleajes generados provienen principalmente del norte-noroeste y tienen la mayor parte de su energía contenida en las bajas frecuencias.

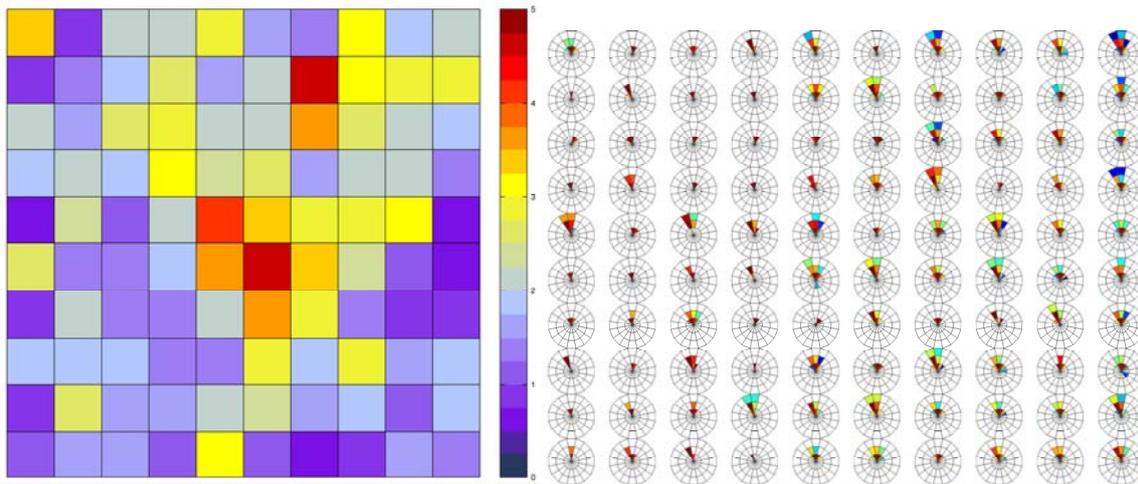


Figura 4.3. Altura de ola significativa media (m) (panel izquierdo) y distribución conjunta Hs-Tp-Dir (panel derecho) para cada tipo de tiempo en Ribadesella.

Si ahora nos centramos en ciertos tipos de tiempo en particular, con el objetivo, por ejemplo, de estudiar la variabilidad estacional, podemos representar espacialmente ciertos estadísticos del oleaje a lo largo de toda la costa asturiana.

Si nos centramos en un tipo de tiempo característico de invierno como el número 82 (véase la figura 4.4) podemos estudiar cuál es su efecto espacial sobre el oleaje en la costa de Asturias. Este tipo de tiempo se caracteriza por un sistema de bajas presiones en el norte de Europa que genera oleaje del noroeste que llega desarrollado (con períodos largos) a la costa de Asturias.

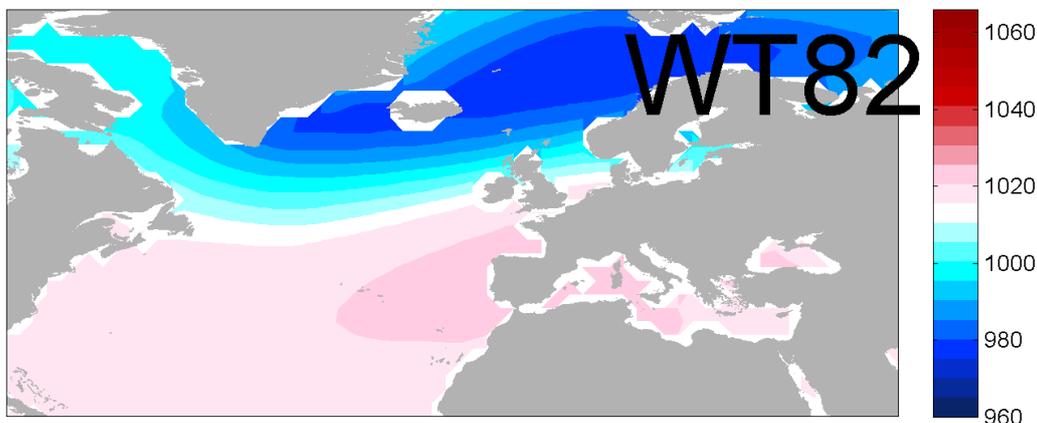


Figura 4.4 Situación sinóptica (tipo de tiempo) número 82 de la clasificación del predictor en 100 tipos de tiempo.

La figura 4.5 muestra la altura de ola media y la altura de ola del percentil 95% en cada punto de la costa generadas por el tipo de tiempo 82. En cada uno de los paneles se puede observar el patrón típico espacial de un oleaje del noroeste, con mayores alturas de ola en las zonas de la costa orientadas al noroeste (hasta 5 m de altura de ola del percentil 95% en la costa de Avilés) y oleajes menores en las zonas abrigadas orientadas al este. También se puede apreciar el efecto de sombra que produce el Cabo Peñas en toda la zona de Luanco, Candás y Gijón.

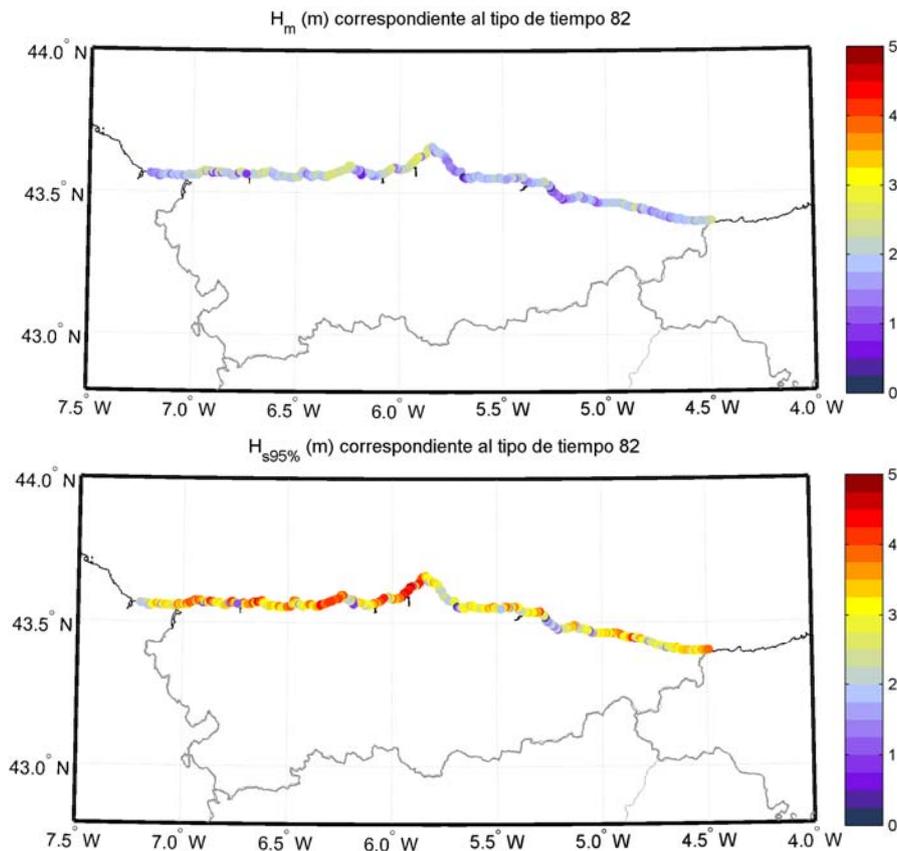


Figura 4.5. H_{smedia} y $H_{95\%}$ para el tipo de tiempo 82 a lo largo de la costa asturiana.

En el caso ahora de un tipo de tiempo característico de verano, como es el 37, caracterizado por un sistema de altas presiones en las Azores (véase la figura 4.6) los estadísticos del oleaje antes analizados a lo largo de la costa de Asturias se muestran en la figura 4.7.

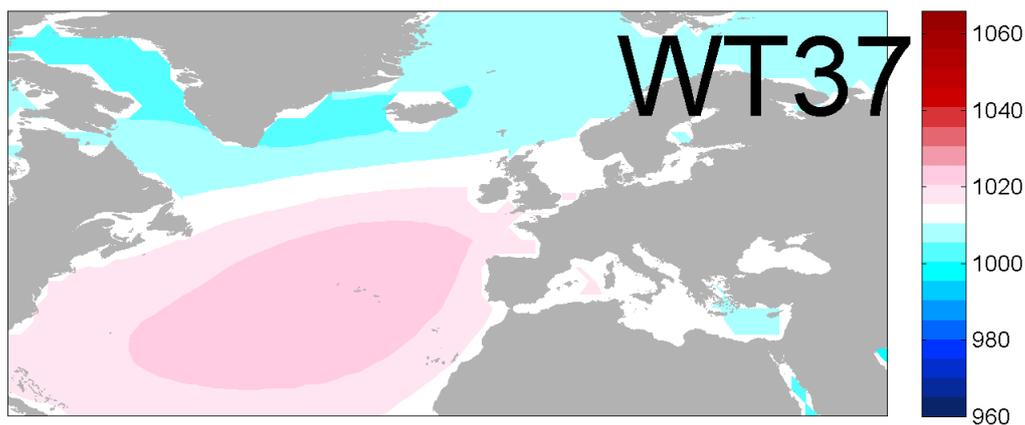


Figura 4.6. Situación sinóptica (tipo de tiempo) número 37 de la clasificación del predictor en 100 tipos de tiempo.

Se puede ver como este tipo de tiempo produce menor oleaje, siendo las mayores alturas de ola medias cercanas a 1.25 m (cuando en el caso anterior llegaban a 3 m en las zonas más expuestas) y las alturas de ola correspondientes al percentil del 95% en torno a 2 m en las zonas más expuestas al noroeste.

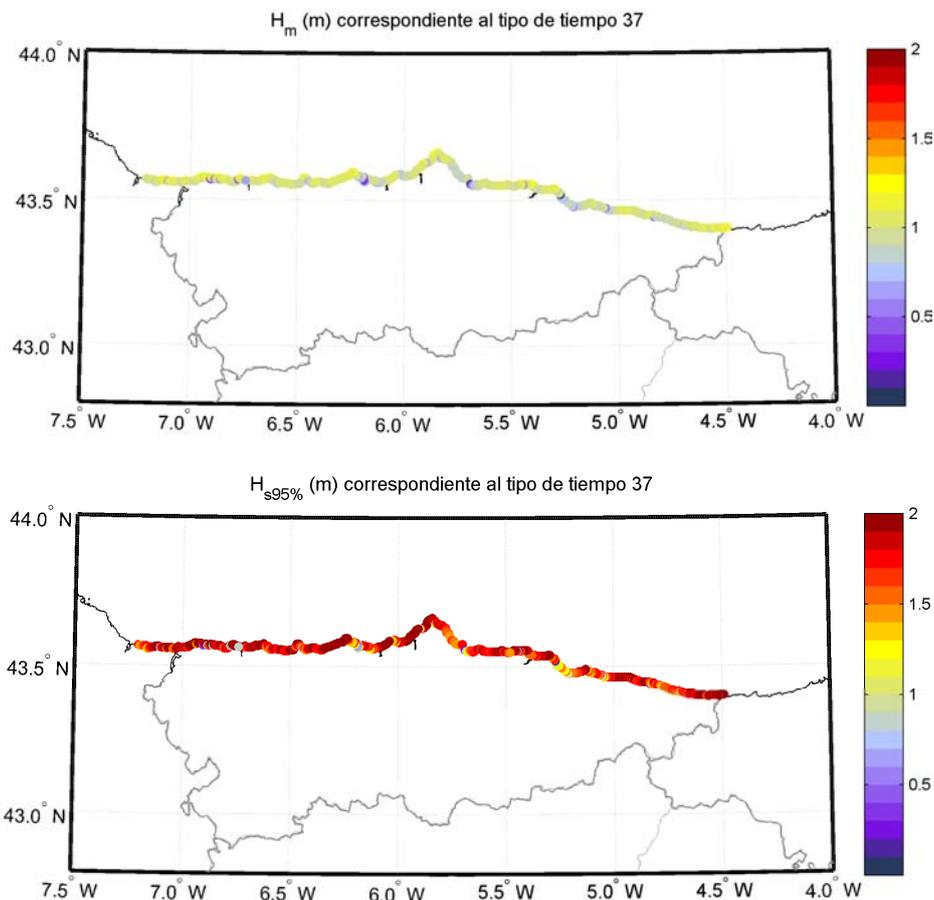


Figura 4.7. H_{smedia} y $H_{s95\%}$ para el tipo de tiempo 37 a lo largo de la costa asturiana.

En cuanto al análisis de las tendencias, los cambios en las probabilidades del predictor a lo largo del siglo XX y la relación estadística entre predictor-predictando permite obtener cuáles han sido los cambios en la altura de ola en, por ejemplo, tres períodos de tiempo.

La figura 4.8 muestra las diferencias en la altura de ola media (en cm) entre los tres períodos de estudio del siglo XX (1880-1909, 1910-1939 y 1940-1969) y el período de control 1979-2000. Los gráficos nos informan de un aumento de la altura de ola en el periodo de control (1979-2000) respecto a los tres periodos considerados en el siglo XX, es decir, la altura de ola en el periodo histórico más reciente es mayor que en los anteriores periodos históricos. La altura de ola media es superior (hasta 15 cm más) a la de periodos previos al de control en todos los puntos de la costa asturiana, variando ligeramente las diferencias espacialmente. Las diferencias son mayores con respecto al primer periodo 1880-1909 que respecto a los periodos 1910-1939 y 1940-1969. A medida que avanzamos en el siglo XX las diferencias se van reduciendo, es decir, que la altura de ola media ha ido aumentando gradualmente a lo largo del siglo.

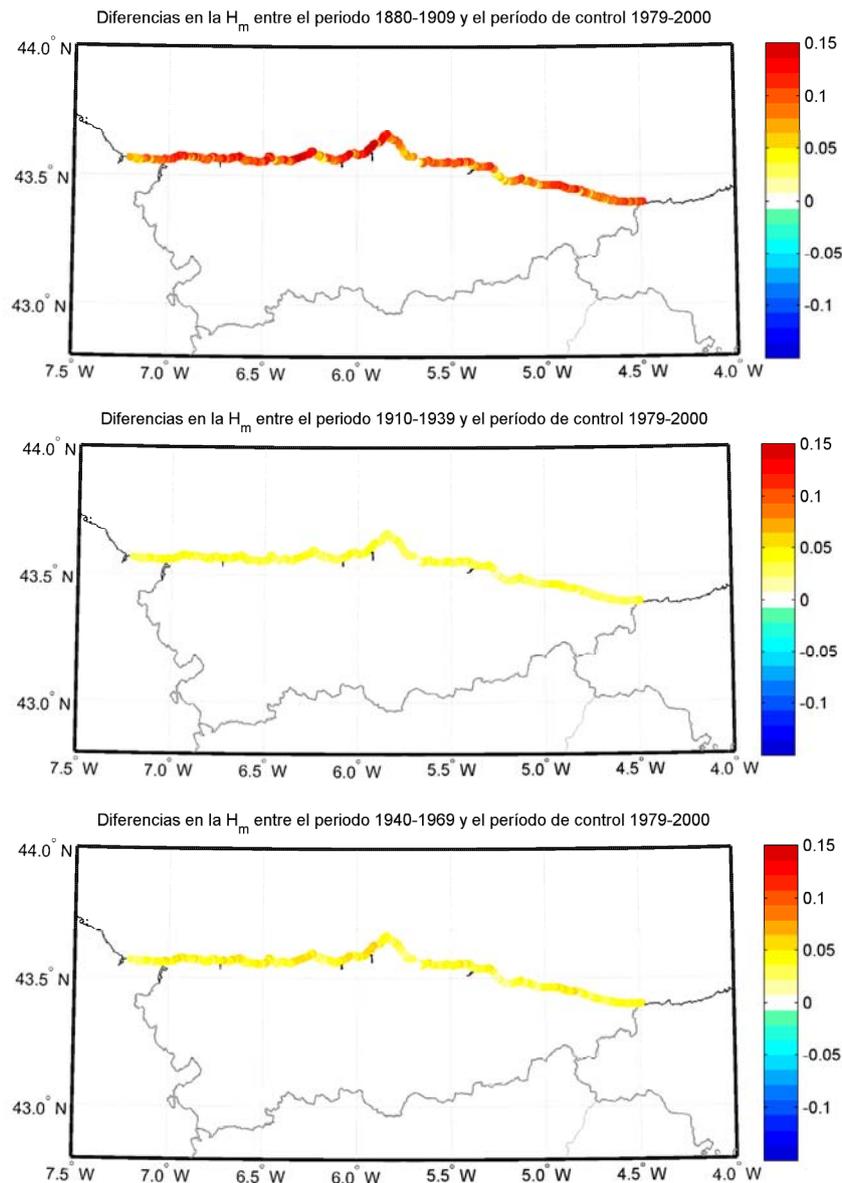


Figura 4.8. Diferencias (m) en la altura de ola significativa media (H_{smedia}) entre los periodos 1880-1909 (panel superior), 1910-1939 (panel central) y 1940-1969 (panel inferior) y el periodo de control 1979-2000.

En el caso de estudiar un estadístico que represente la cola alta de la distribución de oleaje, como es la altura de ola correspondiente al percentil del 95 %, vemos que el comportamiento es igual que con la H_{smedia} (véase la figura 4.9). En el periodo de control los valores de $H_{95\%}$ son mayores (hasta 25 cm más en las zonas más expuestas a los oleajes del noroeste) que los periodos a principio y hasta mediados del siglo XX. A medida que avanza el siglo las diferencias van disminuyendo, es decir, la $H_{95\%}$ ha ido aumentando a lo largo de todo el siglo XX.

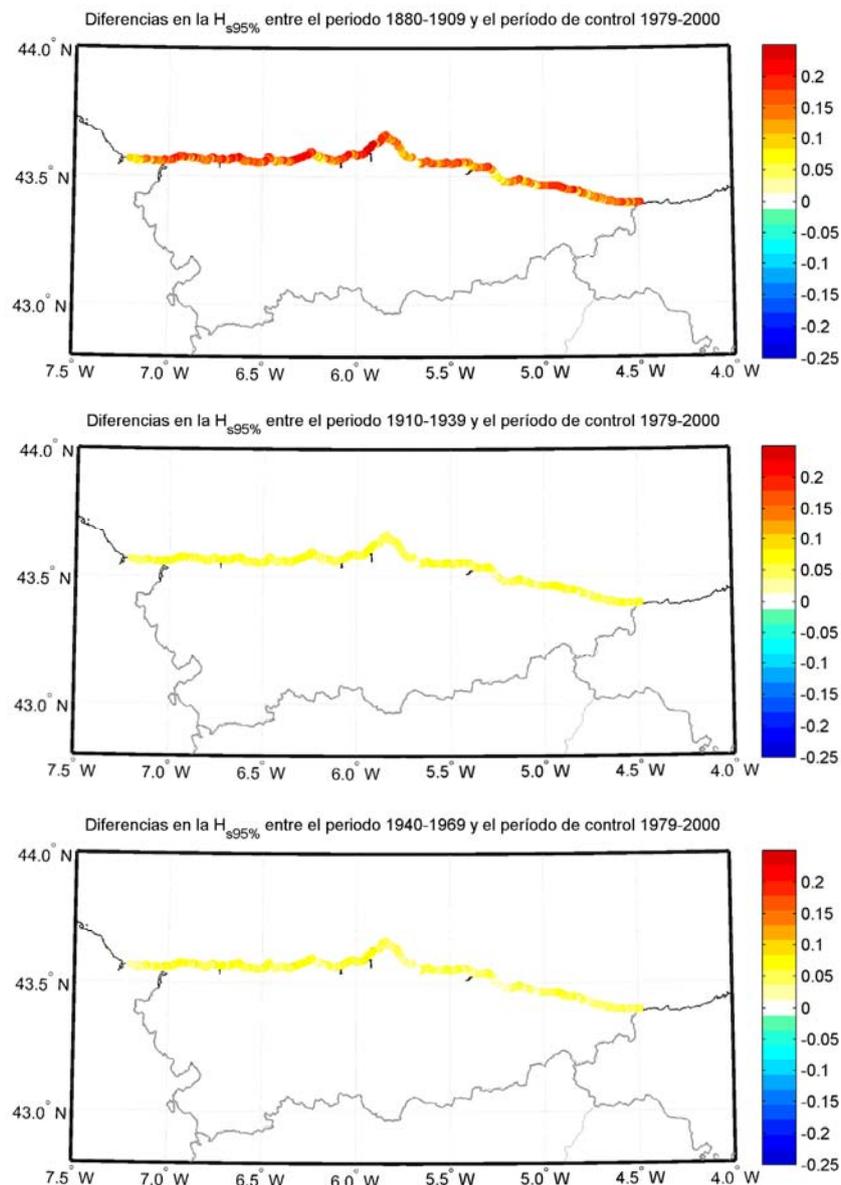


Figura 4.9. Diferencias (m) en la $H_{95\%}$ entre los periodos 1880-1909 (panel superior), 1910-1939 (panel central) y 1940-1969 (panel inferior) y el periodo de control 1979-2000.

Se han realizado diversos estudios sobre la variación de las condiciones de oleaje a lo largo del siglo XX. A partir del reanálisis atmosférico 20CR, Bertin et al. (2013) han generado una base de datos de oleaje que cubre todo el Atlántico Norte durante el siglo XX (1900-2008), obtenida dinámicamente mediante un modelo numérico. A partir del análisis de los datos, se ha obtenido una tendencia positiva en todo el Atlántico Norte, con un patrón espacial de mayores aumentos en el norte, disminuyendo hacia el sur. En concreto, en el Cantábrico, se obtuvieron tendencias de unos 0.0025 m/año. Gulev y Grigorieva (2004) encontraron una tendencia media de 0.008 m/año en el periodo 1900-2002 a partir de medidas visuales en el Atlántico Norte. Wang et al. (2012) también ha realizado una reconstrucción de la altura de ola a lo largo del siglo XX en el Atlántico Norte. En este caso, se aplicó un modelo de downscaling estadístico para la proyectar el reanálisis atmosférico 20CR. El análisis de la evolución del oleaje se ha realizado

considerando la altura de ola máxima estacional por lo que no puede realizarse una comparación directa con los resultados presentados en este informe. Se obtuvieron tendencias positivas en el periodo 1871-2010 en la parte noreste del Atlántico Norte, siendo la magnitud de esta tendencia mayor en la mitad del siglo XX. Las tendencias de la altura de ola media han sido calculadas para el periodo 1958-2009, obteniéndose valores del orden de 0.0010 m/año para la zona del Cantábrico, que coinciden con las magnitudes obtenidas para otros reanálisis (MSC50 y ERA-40) también evaluados en dicho trabajo. Como resumen de la revisión de estos estudios, se puede concluir que parece clara la tendencia positiva en la evolución del oleaje a lo largo del siglo XX.

4.2. Marea meteorológica

Al igual que con el oleaje, se ha obtenido la relación estadística de la marea meteorológica para cada tipo de tiempo y cada punto de estudio de la costa, calibrando y validando previamente el modelo. En la figura 4.10 se puede ver como el modelo reproduce bastante bien la señal de la marea meteorológica en el período de validación.

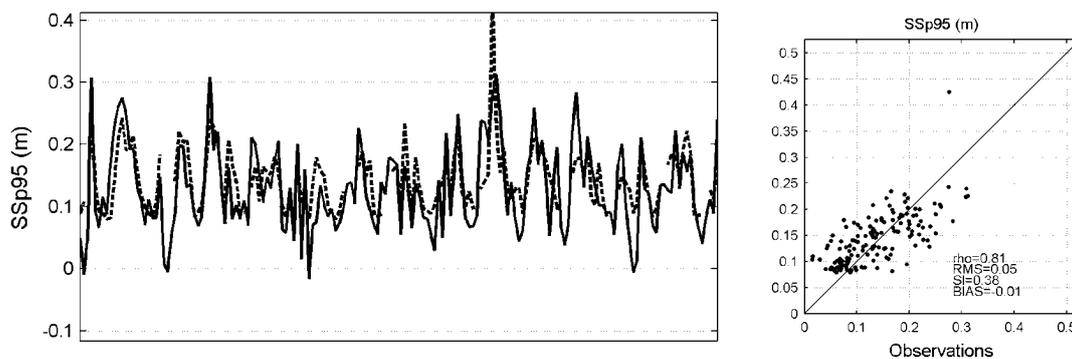


Figura 4.10. Validación del modelo estadístico de marea meteorológica en un punto de la costa asturiana mediante la serie temporal estimada (línea discontinua) y observada (línea continua) y mediante el diagrama de dispersión.

Aplicando el modelo a todos los puntos de la costa, a modo de ejemplo, la figura 4.11 muestra la distribución estadística de la marea meteorológica para cada tipo de tiempo en Avilés. La línea roja indica el 0 puesto que la marea meteorológica presenta valores positivos y negativos sobre el nivel medio del mar. Se puede ver también como los tipos de tiempo más típicos de verano tienen toda la probabilidad de ocurrencia de niveles muy pequeños, en torno a 0, mientras que los tipos de tiempo de invierno generan mareas meteorológicas mayores.

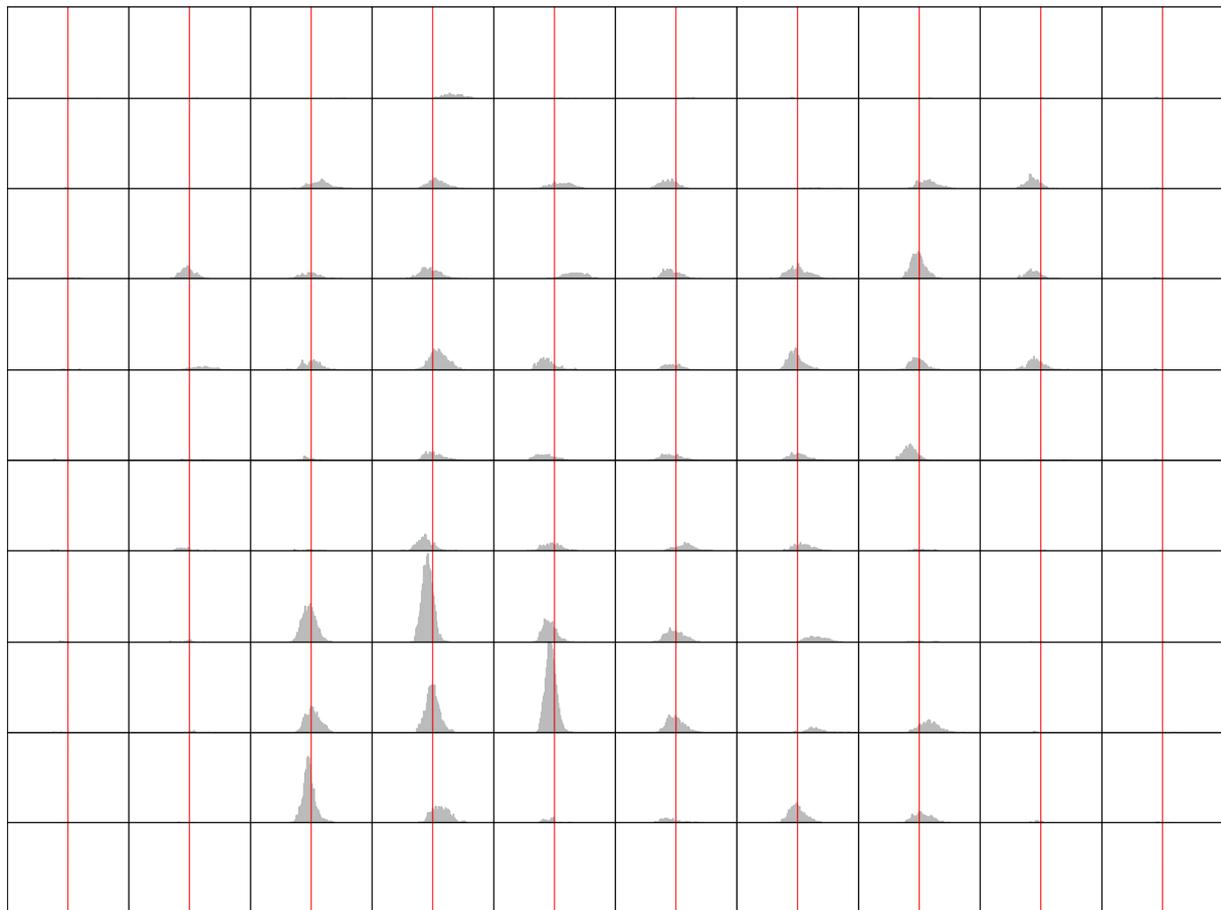


Figura 4.11. Distribución estadística de la marea meteorológica para cada tipo de tiempo en Avilés.

Al igual que para el caso del oleaje, vamos a ver como se distribuye la marea meteorológica espacialmente a lo largo de la costa asturiana para los tipos de tiempo típicos de invierno y verano.

El tipo de tiempo 82, típico de invierno, da lugar a la marea meteorológica que se muestra en la figura 4.12. En el caso de tener en cuenta todos los datos (régimen medio), el estadístico del 95%, que representa la parte alta de la población muestra que ocurren mayores mareas meteorológicas en la zona occidental, de hasta 5.5 cm.

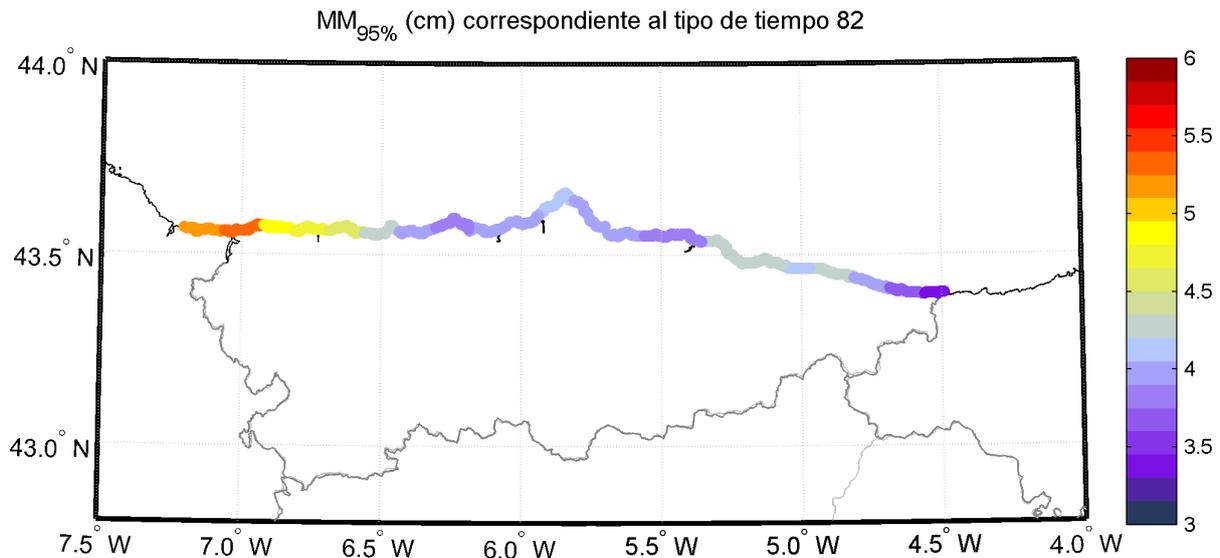


Figura 4.12. $MM_{95\%}$ para el tipo de tiempo 82.

Utilizando los cambios en las probabilidades del predictor, las tendencias obtenidas para el siglo XX en la marea meteorológica son las siguientes. El parámetro estudiado ha sido la marea meteorológica correspondiente al percentil del 95 % ($MM_{95\%}$) y las diferencias entre los periodos 1880-1909, 19010-1939 y 1940-1969 y el periodo de control se muestran en la figura 4.13. Las diferencias en la $MM_{95\%}$ entre el periodo 1979-2000 respecto al periodo 1880-1909 indican una magnitud superior de la marea meteorológica (del orden de 0.3 cm superior) en el periodo histórico más reciente respecto a principios de siglo XX. Sin embargo, las diferencias entre el periodo de control y los periodos 1910-1939 y 1940-1969 señalan una menor magnitud de $MM_{95\%}$ en el periodo histórico más reciente, del orden de 0.20 cm y 0.45 cm de descenso, respectivamente. Por tanto, de estos resultados, se desprende que a principios de siglo la $MM_{95\%}$ era más pequeña que en el período de control, especialmente en la costa oriental de Asturias. A medida que va avanzando el siglo XX la marea meteorológica va aumentando, pasando a ser mayor que en el período de control durante los años 1910-1969, y siendo mayor el incremento en la parte más occidental de Asturias. Pese a este comportamiento, hay que tener en cuenta que la magnitud de los cambios es muy pequeña, no llegando ni a 1 cm de diferencia, tanto en positivo como en negativo. Sin embargo, los cambios identificados en la actividad atmosférica del siglo XX dan lugar a esta tendencia.

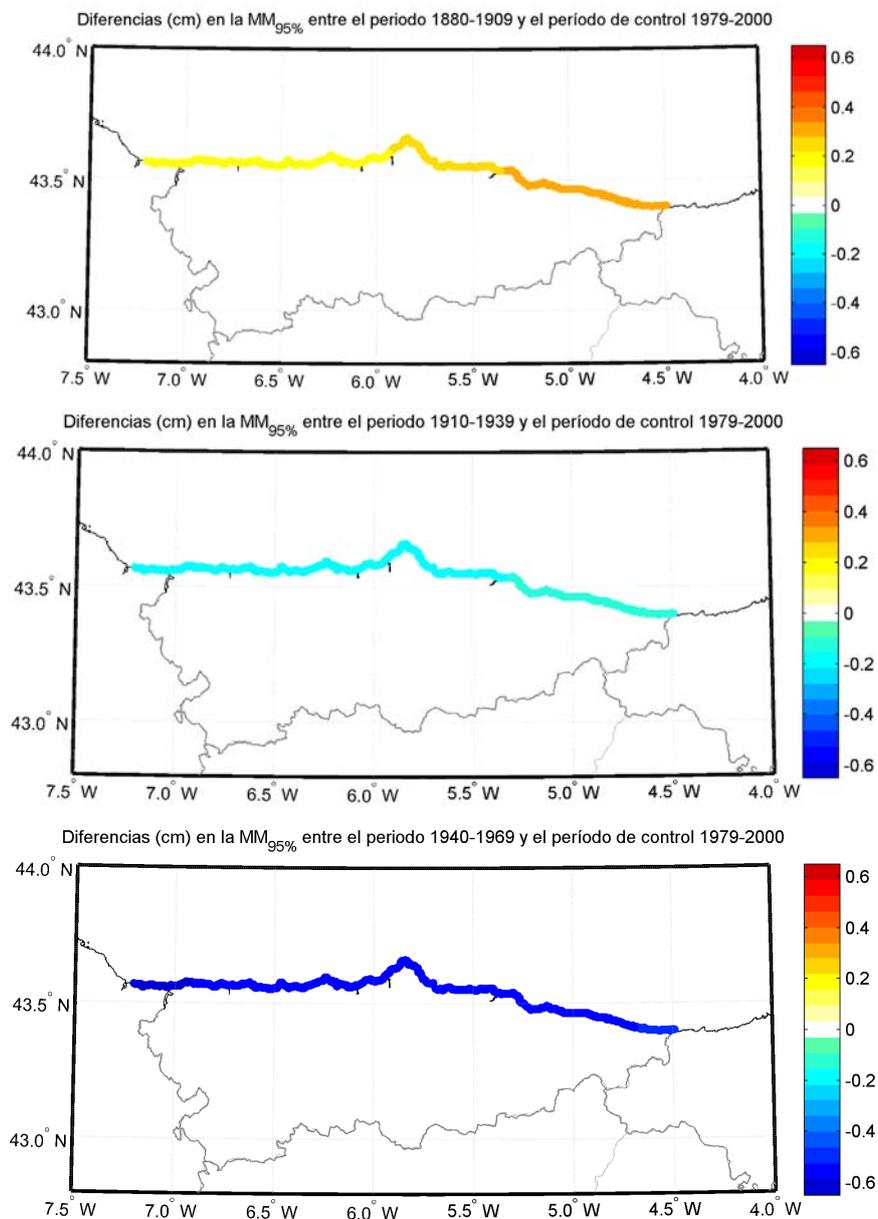


Figura 4.13. Diferencias (cm) en la $MM_{95\%}$ entre los periodos 1880-1909 (panel superior), 1910-1939 (panel central) y 1940-1969 (panel inferior) y el periodo de control 1979-2000.

Se ha realizado una revisión bibliográfica sobre el análisis de la evolución de la marea meteorológica a lo largo del siglo XX. En los estudios encontrados, las tendencias se han calculado a partir de datos de reanálisis que abarcan sólo la segunda mitad del siglo XX. Por ejemplo, en Gomis et al. (2008), las tendencias calculadas sobre la base de datos HAMSOM son del orden de -0.04 cm/año en la costa de Asturias para el periodo 1958-2001 y 0.08 cm/año para el periodo 1993-2001. En Cid et al. (2014), las tendencias se han calculado utilizando la base de datos GOS, obteniéndose valores de -0.12 mm/año para el periodo 1948-2009 y valores de 0.2 mm/año para el periodo 1989-2009 en la costa de Asturias. Por tanto, a pesar de la limitación de las tendencias a la segunda mitad del siglo XX, el descenso detectado entre el periodo 1979-2000 y los periodos 1910-1939 y 1940-1969 concuerdan en signo.

4.3. Indicador de la inundación: nivel total del agua (TWL)

Aunque el nivel total del agua no es una dinámica marina per se, es un indicador de la inundación costera que combina las tres dinámicas marinas más importantes, por lo que se ha considerado importante hacer una caracterización y análisis de esta variable.

En este caso, hay que tener en cuenta que el interés en el TWL está cuando se produce un valor extremo que da lugar a inundación. Pese a que podemos reconstruir las series horarias históricas de TWL a lo largo de todos los puntos de la costa, el interés reside en caracterizar su régimen extremal. Por esta razón, se aplica la metodología de tipos de tiempo para la identificación de los eventos atmosféricos que generan los eventos más extremos de inundación y el análisis de series temporales para la caracterización del régimen extremal. En el caso de la aplicación de la metodología de tipos de tiempo, se asocia a cada tipo de tiempo las excedencias sobre el umbral de TWL del 99.5 % para los distintos puntos a lo largo de la costa. En primer lugar, se ha obtenido el valor umbral de TWL correspondiente al TWL del 99.5 % en cada punto de la costa. La figura 4.14 muestra los valores umbrales de TWL a partir de los que se han seleccionado las excedencias. Se puede ver como en las zonas más acantiladas de la costa (Cabo Peñas o zona de Lastres) los valores del umbral son más elevados (hasta 5.5 m) que en las zonas de playa donde está en torno a los 3-3.5 m.

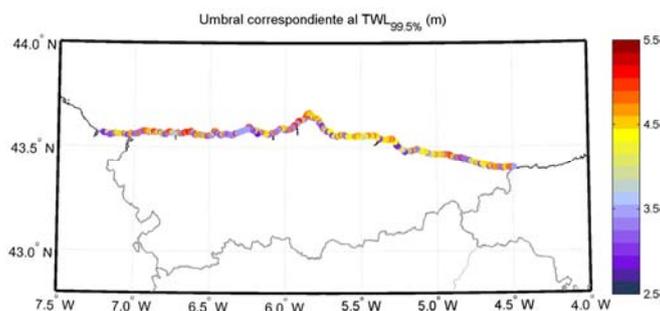


Figura 4.14. Umbral de TWL correspondiente al TWL_{99.5%} en cada punto de estudio.

En segundo lugar, se han volcado las excedencias sobre ese umbral en la rejilla de tipos de tiempo. En la figura 4.15 se muestran, para las playas de Vegadeo, Avilés y Ribadesella el máximo valor del TWL ocurrido para cada tipo de tiempo. De esta forma podemos identificar en cada punto cuáles han sido los tipos de tiempo que han causado mayor inundación. En Avilés los tipos de tiempo que generan mayor TWL son el 67, 72 y 78, en Vegadeo el 72 y 78 son los críticos mientras que en Ribadesella el 78 es el más destacable. Hay que señalar también, que de estos tipos de tiempo solo el 72 presenta una mayor probabilidad que los demás en invierno y, los tres están caracterizados por un sistema de bajas presiones en el Atlántico norte que varía la posición de su centro.

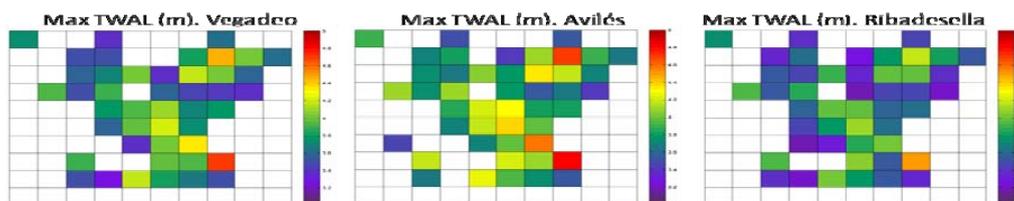


Figura 4.15. Máximos TWL ocurrido en cada tipo de tiempo en Vegadeo (panel izquierdo), Avilés (panel central) y Ribadesella (panel derecho).

Para cada uno de los tres tipos de tiempo identificados se ha obtenido la variación espacial del TWL máximo en cada punto de la costa asturiana. La figura 4.16 muestra la variación espacial del máximo TWL ocurrido debido a cada uno de los tres tipos de tiempo (67, 72 y 78). Se puede ver cómo según la posición del centro de bajas presiones el patrón de inundación cambia a lo largo de la costa. El tipo de tiempo 72 produce mayores inundaciones en las playas en la parte occidental de Asturias, mientras que el tipo de tiempo 78, que presenta el centro de bajas entre las Islas Británicas e Irlanda y menor intensidad genera mayores inundaciones en la costa oriental.

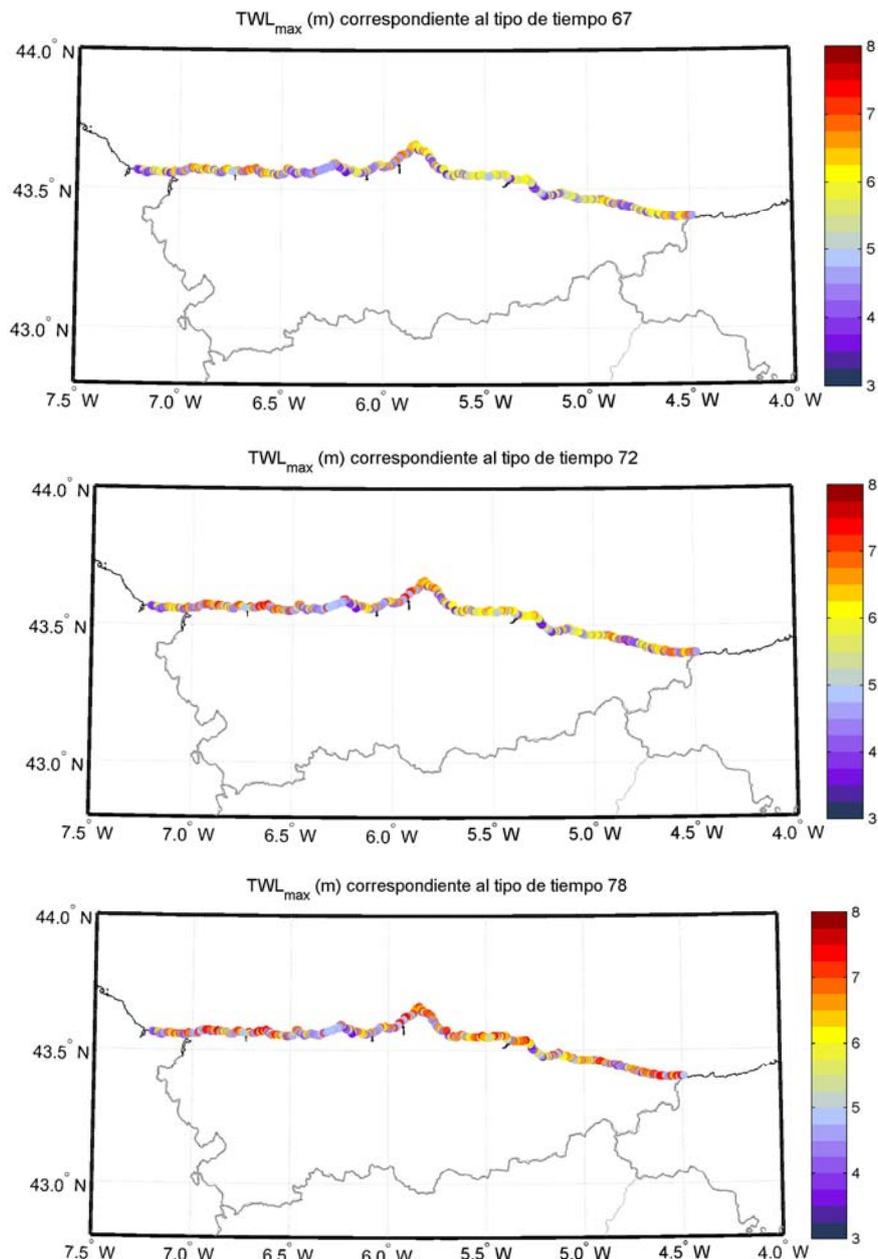


Figura 4.16. Distribución espacial el máximo TWL ocurrido para los tipos de tiempo 67 (panel superior), 72 (panel central) y 78 (panel inferior).

Para completar la caracterización del indicador de la inundación, utilizando el análisis clásico de series temporales se ha obtenido el régimen extremal ajustando el modelo Pareto-Poisson para modelar tanto la intensidad como la frecuencia de los eventos. En cada punto se ha obtenido el cuantil asociado a distintos períodos de retorno y, a modo de ejemplo, en la figura 4.17 se muestra el cuantil asociado a 100 años. Se puede ver como en las zonas de acantilado y puerto este valor llega hasta los 8 m mientras que en las zonas expuestas de playa estamos en torno a los 5 m.

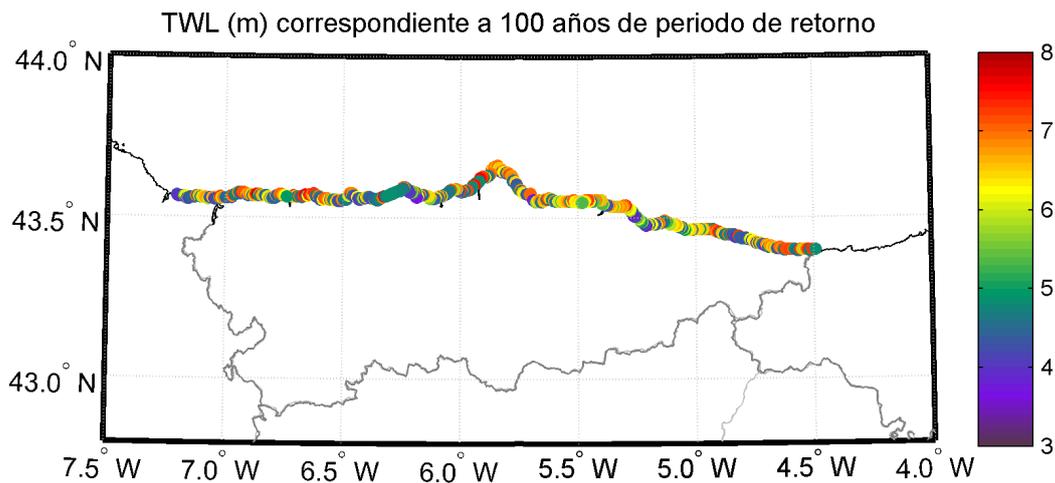


Figura 4.17. Cuantil de TWL asociado a 100 años de período de retorno en cada punto de la costa asturiana.

Por último, debido a la excepcionalidad del temporal del 2 de Febrero de 2014 y a la documentación de este y de sus daños, se ha hecho un análisis forense obteniendo el período de retorno correspondiente asociado a ese evento en cada punto de la costa (véase la figura 4.18). Como se puede observar, la variación de unos puntos a otros es elevada, alcanzándose los 160 años en las zonas más expuestas al noroeste y en torno a 40 años en las zonas más abrigadas.

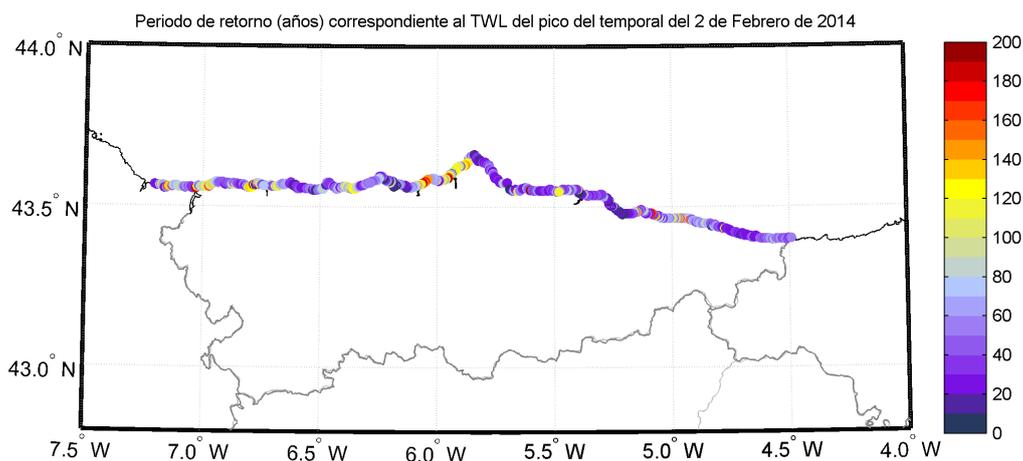


Figura 4.18. Período de retorno correspondiente al máximo TWL del temporal del 2 de Febrero de 2014.

4.4. Nivel medio del mar

El aumento del nivel medio del mar es uno de los principales efectos del cambio climático. El ascenso medio del nivel del mar global entre 1880-2009 ha sido aproximadamente de 210 mm (Church y White, 2011) pero existe una considerable variabilidad de la tasa de ascenso a lo largo del siglo XX. El registro de cambios pasados en el nivel del mar, a escala global, se ha realizado mediante datos de satélite (desde 1993) y reconstrucción de observaciones del nivel del mar (periodo 1880-2009). Desde 1993, la alta calidad de los datos de satélite ha permitido un modelado más preciso del cambio en el nivel medio del mar global. La estimación en la tasa de ascenso para la era satelital corresponde a 3.2 ± 0.4 mm/año, mientras que para el periodo precedente es de 2.8 ± 0.8 mm/año.

El análisis hecho por Marcos et al. (2005) a los mareógrafos corregidos de Santander, Coruña y Vigo indica que durante la segunda parte del siglo XX el nivel del mar ha estado creciendo a razón de 2,12, 2,51 y 2,91 mm/año, respectivamente. Posteriormente, el estudio fue completado y ampliado para incluir el Mediterráneo (Marcos et al. 2009). Los resultados muestran tendencias que varían entre los -0,5 y 3 mm/año, con mayores valores en el Atlántico (1,84 mm/año en Santander y 2,64 mm/año en Vigo).

En el periodo 1880-2009 estudiado con los datos globales de Church y White (2006) para la zona de Asturias, la tendencia de largo plazo encontrada está en torno a 1.5 mm/año con muy poca variabilidad a lo largo de la costa.

4.5. Temperatura superficial del agua del mar

Utilizando el análisis clásico de series temporales a los datos OSTIA de temperatura superficial del agua del mar se ha caracterizado esta variable, altamente relacionada con los impactos sobre ecosistemas, en la costa de Asturias.

La figura 4.19 muestra la rejilla espacial donde se dispone de las series temporales de 30 años de temperatura. Además se muestran cuatro puntos en la costa elegidos para mostrar algunos de los resultados: Luarca, Avilés, Gijón y Llanes.

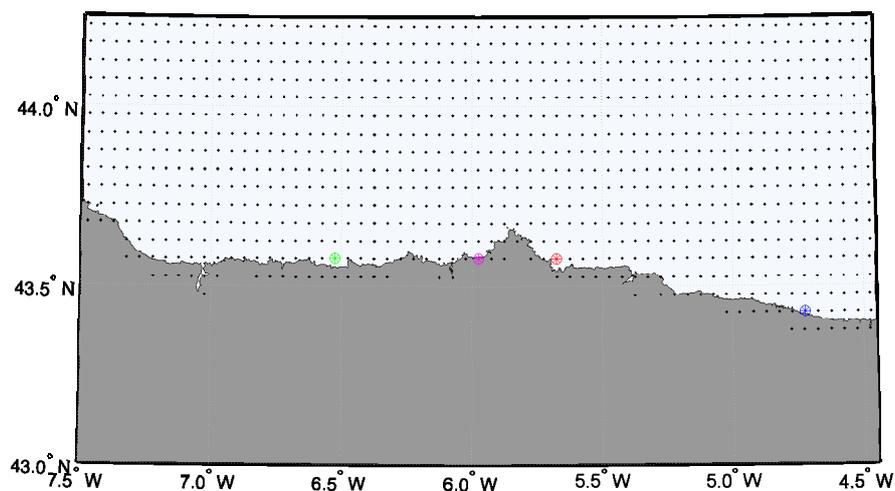


Figura 4.19. Malla de datos de temperatura superficial de agua del mar y puntos elegidos en Luanco (verde), Avilés (rosa), Gijón (rojo) y Llanes (azul).

La figura 4.20 muestra la temperatura media en cada punto del dominio de estudio en el período 1983-2013. Se puede ver como la parte oriental de Asturias tiene una temperatura media más alta y hay un gradiente decreciente hacia el oeste. En la zona de costa es más acentuado, especialmente al oeste del Cabo Peñas, donde se produce surgencia de agua fría de capas más profundas hacia la superficie debido a la acción de los vientos del noreste.

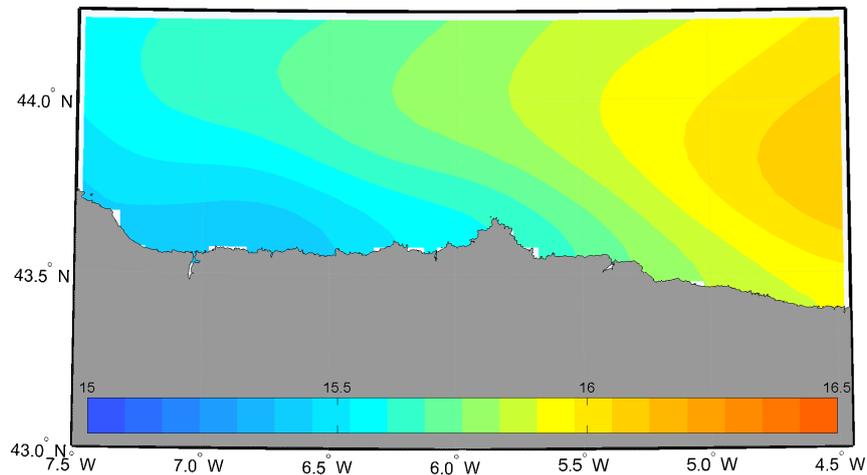


Figura 4.20. Variación espacial de la media temperatura superficial del agua del mar en el período 1985-2013.

La figura 4.20 muestra la variación espacial en la desviación típica de los datos de temperatura. Este gráfico informa acerca de la variabilidad de los datos, dejando ver que en la parte oriental de Asturias las variaciones en la temperatura superficial del agua son más acusadas que a medida que nos movemos hacia el oeste, donde el rango de temperaturas está más acotado.

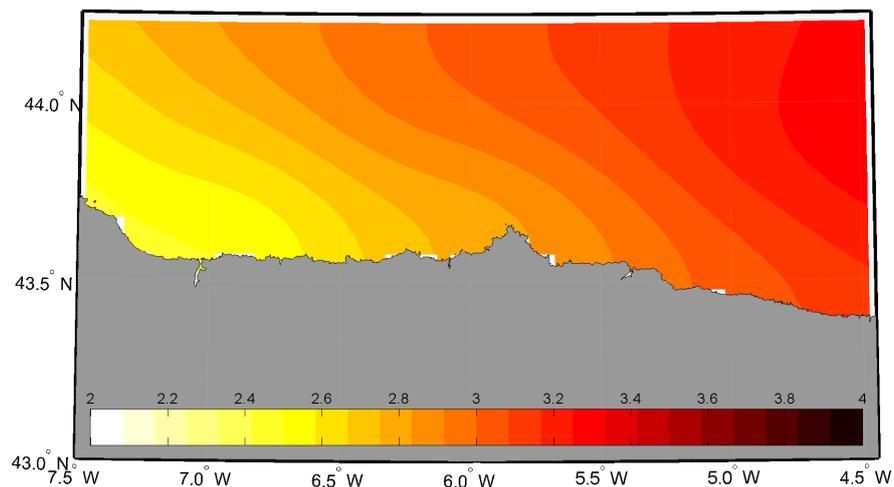


Figura 4.21. Variación espacial de la desviación típica de la temperatura superficial del agua del mar en el período 1985-2013.

A modo de ejemplo, la figura 4.21 muestra la serie temporal de temperatura superficial del agua del mar en los cuatro puntos elegidos en la figura 4.19. Se puede ver como Llanes es el punto que alcanza mayores valores de la temperatura y Luarca el que menos, tal y como se ha podido ver en la figura 4.20.

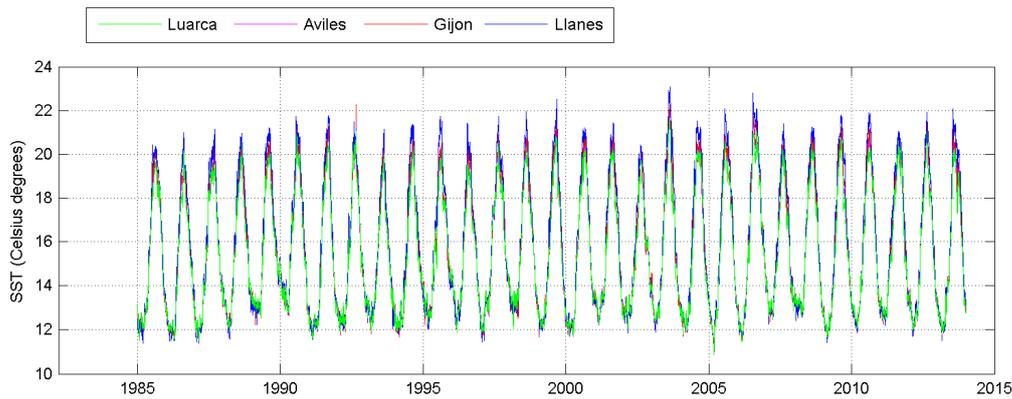


Figura 4.22. Serie temporal de temperatura superficial del agua del mar en los cuatro puntos elegidos.

En cada uno de los puntos de la rejilla de datos se ha obtenido la variabilidad estacional e interanual. La figura 4.23 muestra la anomalía estacional e interanual de la temperatura del agua del mar en Luarca. Se puede ver que de invierno a verano la temperatura oscila en torno a 8.5° , con algunos años de hasta 10° de oscilación. En cuanto a la variación interanual se puede ver que hay años con agua hasta 3° más cálida, mientras que hay otros que experimentan un enfriamiento de hasta 2.5° .

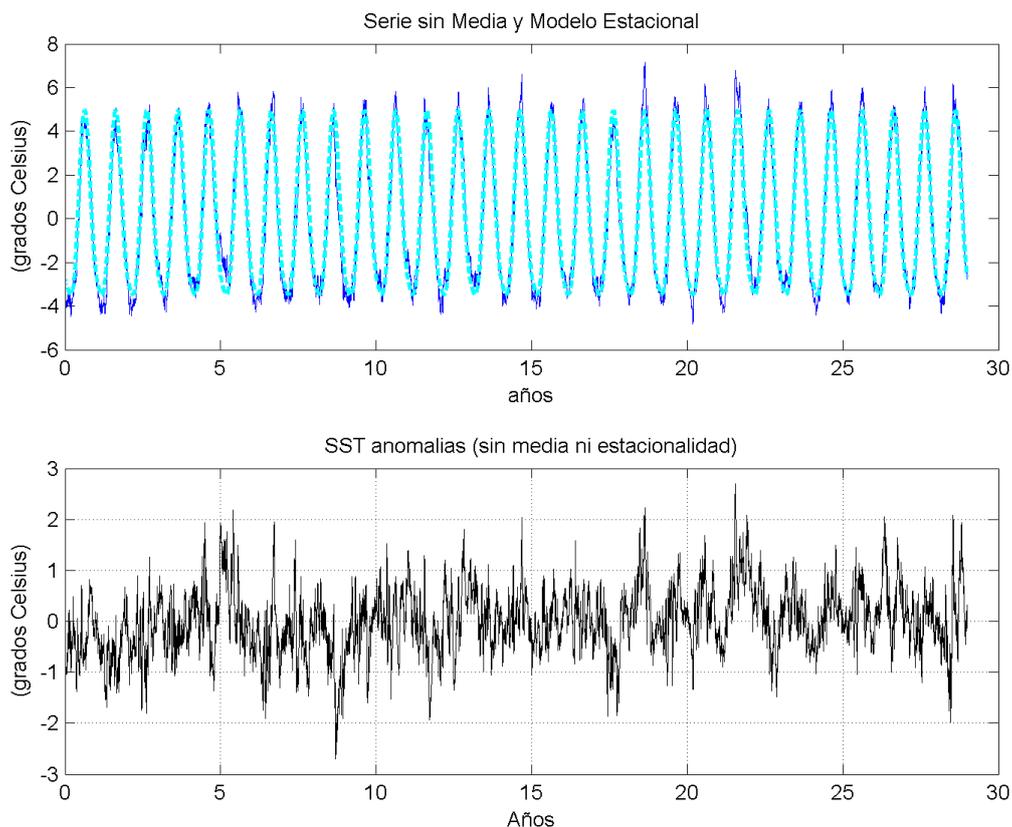


Figura 4.23. Anomalía estacional de la temperatura superficial del agua del mar (panel superior) y anomalía interanual (panel inferior) en Luarca.

En cada punto de estudio se han calculado las variaciones intra-anales de la temperatura. La figura 4.24 muestra un gráfico (para el punto de Gijón) en el que se muestra, a lo largo de los años, para cada día del año cuál fue la temperatura del mar. Se puede apreciar como hay años en los que la variabilidad es mayor, dónde se alcanzaron valores más extremos y dónde la superficie del mar tardó más en calentarse o enfriarse que otros.

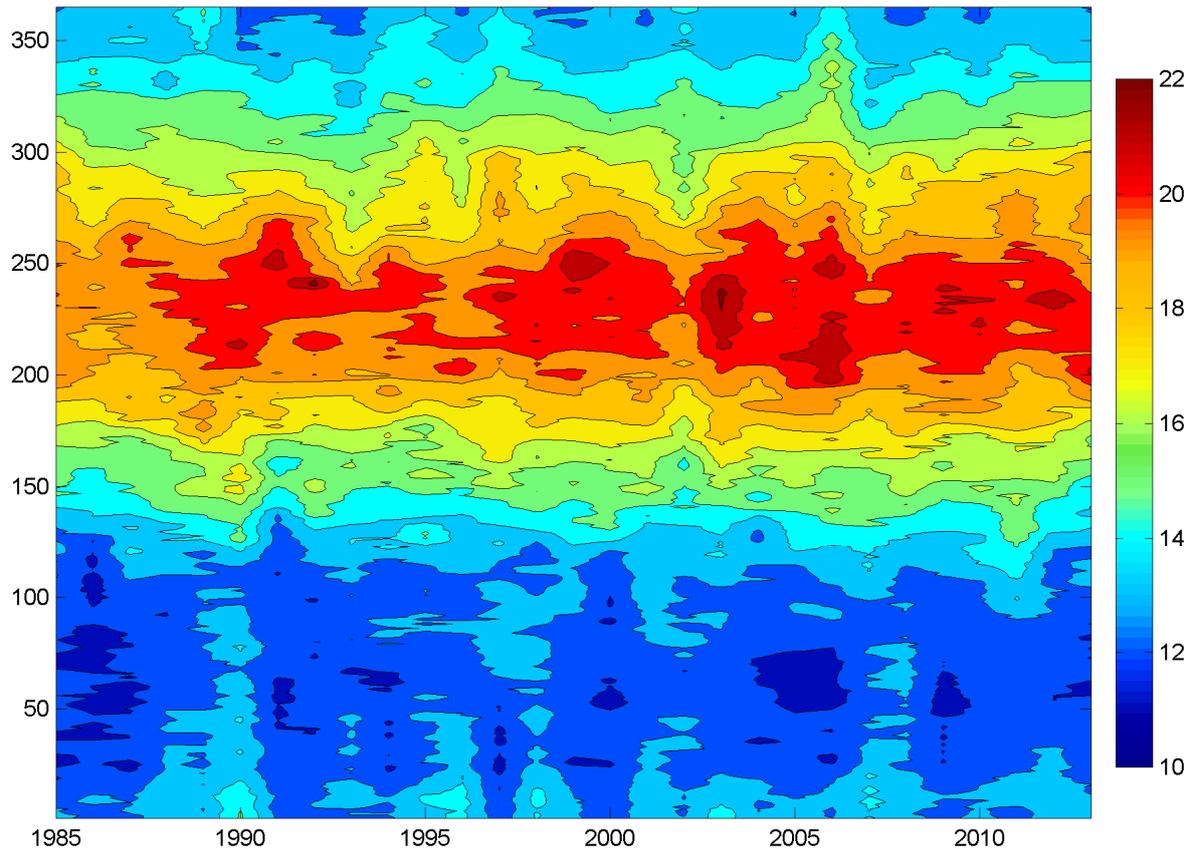


Figura 4.24. Variaciones intra-anales de la temperatura superficial del agua del mar en Gijón a lo largo de los años.

A partir de las variaciones intra-anales de la temperatura se ha ajustado un modelo sinusoidal que permite obtener el patrón estacional en cada punto. La figura 4.25 muestra el patrón obtenido en el punto de Gijón.

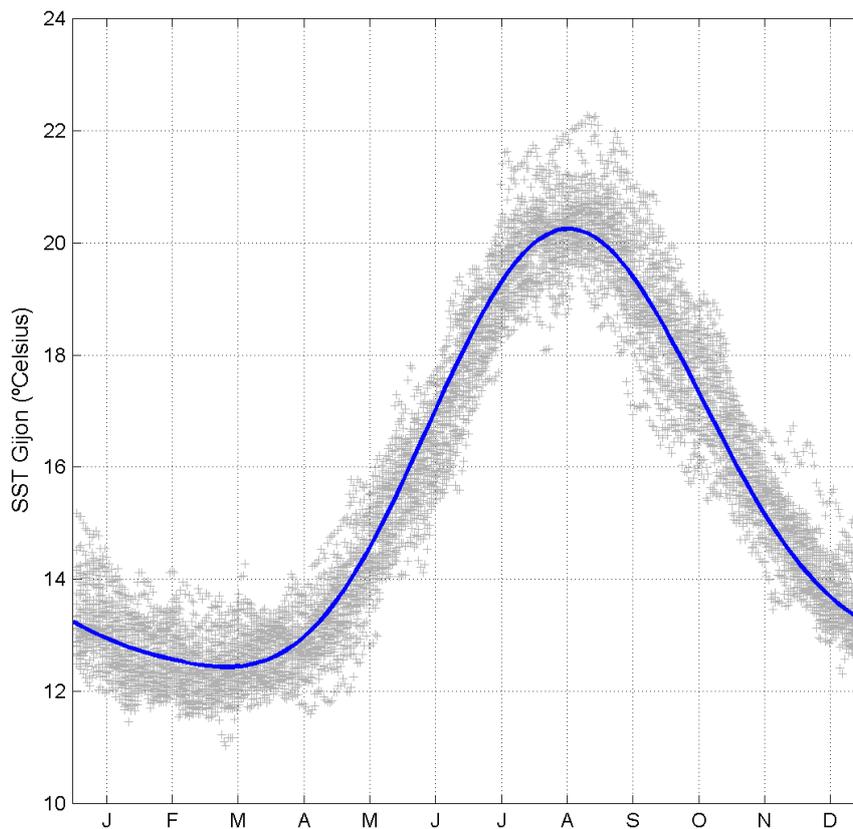


Figura 4.25. Patrón estacional de la temperatura superficial del agua del mar en Gijón.

Por último, utilizando un modelo de regresión heterocedástico, se ha obtenido la tendencia de largo plazo en el período 1983-2013 en cada uno de los puntos del dominio (véase la figura 4.26). Con la tendencia obtenida se ha producido un incremento de en torno a 0.44° en la temperatura superficial del agua del mar en los últimos 30 años en la costa de Asturias.

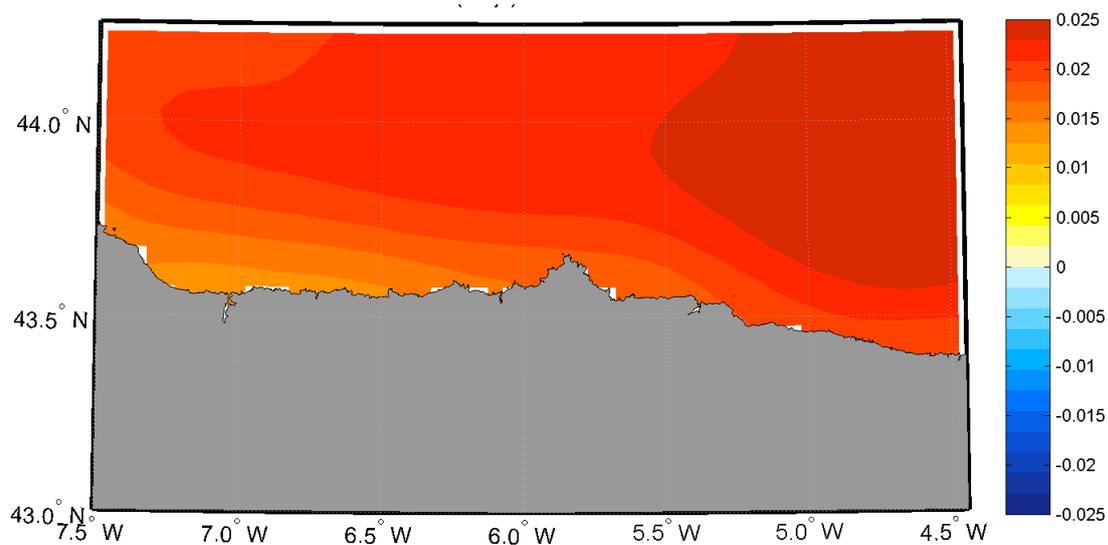


Figura 4.26. Variación espacial de la tendencia de largo plazo ($^{\circ}$ /año) obtenida en el período 1983-2013.

5. CONCLUSIONES

A lo largo de la tarea 2.1 se ha realizado una caracterización histórica de las dinámicas mostrando su variabilidad espacial y temporal y obteniendo los cambios producidos en las variables de estudio a lo largo del siglo XX a partir de las tendencias de largo plazo.

5.1. Dinámicas y variables de estudio

En lo que respecta a la descripción de las dinámicas y variables consideradas en el estudio así como a su caracterización, los puntos a destacar son los siguientes:

- Tal y como cabía esperar, las zonas de la costa orientadas al noroeste, y que por lo tanto tienen mayor exposición a los oleajes más energéticos, presentan mayores alturas de ola (hasta 8.5 m de altura de ola significativa máxima en la zona de Avilés) que las partes de la costa más abrigadas, orientadas al noreste.
- Se observa poca variabilidad en la distribución espacial de la marea meteorológica máxima (del orden de 0.04 m e) alcanzándose los 63 cm en el tramo de costa de Villaviciosa a Llanes.
- Aunque no es una variable aleatoria ni susceptible de cambio climático, la marea astronómica (MA) es uno de los factores que contribuye a la inundación costera, siendo en el Cantábrico un factor fundamental debido a su gran amplitud, que oscila entre los 2.18 y 2.22 m.
- La combinación de las dinámicas marinas oleaje (en términos de set up), marea astronómica y marea meteorológica en un indicador del nivel total del agua (TWL de sus siglas en inglés) ha permitido caracterizar, desde el punto de vista de las dinámicas marinas, la inundación costera. Este indicador muestra una variación espacial que depende fundamentalmente de dos factores: por un lado, la zona occidental de Asturias presenta, en general, valores mayores del TWL que la zona oriental, que queda más abrigada por el Cabo Peñas de los mares más energéticos; por otro lado, el frente costero es también un factor determinante, puesto que la formulación empleada origina mayores valores de set up en las zonas de acantilado o puerto. De esta manera, hay zonas de la costa occidental, como la playa de Salinas o San Juan de la Arena, que presentan menores valores de TWL que algunas zonas de la costa oriental (área de Lastres) que son más acantiladas.

5.2. Metodologías

La caracterización histórica de las dinámicas se ha llevado a cabo siguiendo dos tipos de metodologías diferentes. Las conclusiones que pueden extraerse son las siguientes:

- En el caso de las dinámicas marinas oleaje y marea meteorológica se ha optado por utilizar una metodología novedosa de *downscaling* estadístico basada en tipos de tiempo. La naturaleza de estas dinámicas hace que su generación se derive de la situación de la atmósfera (en términos de viento y presión atmosférica como variables generadoras), de manera que, estudiando los estados de ésta y sus cambios, podemos inferir los cambios en el oleaje y la marea meteorológica. Además, esta metodología nos va a permitir proyectar al futuro los cambios en estas dinámicas bajo distintos escenarios de cambio climático. Para su aplicación,

es necesario conocer cómo y dónde se ha generado el oleaje que llega al punto de estudio. Para ello se ha utilizado un método que permite caracterizar la energía del oleaje y su tiempo de viaje desde el área de generación hasta el punto de estudio. En base a los resultados obtenidos, el oleaje que llega a la costa asturiana está generado en la zona noroeste del Océano Atlántico y tarda de 3 a 6 días en llegar.

- En el caso de la temperatura superficial del agua del mar y el nivel medio del mar, se ha optado por utilizar análisis de series temporales mediante modelos estadísticos. Este análisis ha permitido obtener las variaciones estacionales, interanuales y la tendencia de largo plazo de la variable de estudio.

5.3. Resultados

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos pueden extraerse las conclusiones que se presentan a continuación:

- La altura de ola en el periodo histórico más reciente (1940-1969) es mayor que en los anteriores periodos históricos (1880-1909 y 1901-1939). La altura de ola significativa media ($H_{s,media}$) es superior (hasta 15 cm más) a la de periodos previos al de control en todos los puntos de la costa asturiana, variando ligeramente las diferencias espacialmente. Las diferencias son mayores con respecto al primer periodo 1880-1909 que respecto a los periodos 1910-1939 y 1940-1969. A medida que avanzamos en el siglo XX las diferencias se van reduciendo, es decir, que la altura de ola significativa media ha ido aumentando gradualmente a lo largo del siglo.
- La variación de altura de ola correspondiente al percentil del 95% se rige por un patrón similar a la $H_{s,media}$. En el periodo de control los valores de $H_{95\%}$ son mayores (hasta 25 cm más en las zonas más expuestas a los oleajes del noroeste) que en el resto de periodos hasta mediados del siglo XX. A medida que avanza el siglo las diferencias van disminuyendo, es decir, la $H_{95\%}$ ha ido aumentando a lo largo de todo el siglo XX.
- Las tendencias obtenidas para el siglo XX en la marea meteorológica correspondiente al percentil del 95% ($MM_{95\%}$) indican que entre el periodo 1979-2000 respecto al periodo 1880-1909 la marea meteorológica era del orden de 0.3 cm superior en el periodo histórico más reciente respecto a principios de siglo XX. Sin embargo, las diferencias entre el periodo de control y los periodos 1910-1939 y 1940-1969 señalan una menor magnitud de $MM_{95\%}$ en el periodo histórico más reciente, del orden de 0.20 cm y 0.45 cm de descenso, respectivamente. De estos resultados se extrae que a principios de siglo la $MM_{95\%}$ era más pequeña que en el periodo de control, sobre todo en la costa oriental de Asturias. A medida que ha ido avanzando el siglo XX la marea meteorológica ha ido aumentando, pasando a ser mayor que en el periodo de control durante los años 1910-1969, y siendo mayor el incremento en la parte más occidental de Asturias. No obstante, hay que tener en cuenta que la magnitud de los cambios es muy pequeña, no llegando ni a 1 cm de diferencia, tanto en positivo como en negativo.

- Aunque el nivel total del agua no es una dinámica marina per se, es un indicador de la inundación costera que combina las tres dinámicas marinas más importantes. Tras la aplicación de la metodología de tipos de tiempo, se ha obtenido el valor umbral de TWL correspondiente al TWL del 99.5 % en cada punto de la costa. En las zonas más acantiladas de la costa (Cabo Peñas o zona de Lastres) los valores del umbral son más elevados (hasta 5.5 m) que en las zonas de playa donde está en torno a los 3-3.5 m. El análisis extremal de la serie histórica de TWL ha permitido obtener cuantiles asociados a distintos periodos de retorno. En las zonas de acantilado y puerto el TWL de 100 años de periodo de retorno alcanzando los 8 m mientras que en las zonas expuestas de playa estamos en torno a los 5 m.
- Debido a la excepcionalidad del temporal del 2 de Febrero de 2014 y a la documentación de éste y de sus daños, se ha hecho un análisis forense obteniendo el período de retorno correspondiente asociado a ese evento en cada punto de la costa. Se observa una gran variación de unos puntos a otros, alcanzándose los 160 años en las zonas más expuestas al noroeste y en torno a 40 años en las zonas más abrigadas.
- El aumento del nivel medio del mar es uno de los principales efectos del cambio climático. El ascenso medio del nivel del mar global entre 1880-2009 ha sido aproximadamente de 210 mm, con una considerable variabilidad de la tasa de ascenso a lo largo del siglo XX. La estimación en la tasa de ascenso para la era satelital (desde 1993) corresponde a 3.2 ± 0.4 mm/año, mientras que para el periodo precedente (periodo 1880-2009) es de 2.8 ± 0.8 mm/año.
- El análisis hecho por Marcos et al. (2005) a los mareógrafos corregidos de Santander, Coruña y Vigo indica que durante la segunda parte del siglo XX el nivel del mar ha estado creciendo a razón de 2,12, 2,51 y 2,91 mm/año respectivamente, mostrando variaciones entre los -0,5 y 3 mm/año, con mayores valores en el Atlántico (1,84 mm/año en Santander y 2,64 mm/año en Vigo). En el periodo 1880-2009, estudiado con los datos globales de Church y White (2006), la tendencia de largo plazo encontrada en la costa asturiana está en torno a 1.5 mm/año con muy poca variabilidad.
- Para el periodo 1983-2013, se ha observado que la parte oriental de Asturias tiene una temperatura media más alta y que hay un gradiente decreciente hacia el oeste, especialmente en la franja costera al oeste del Cabo Peñas, donde se produce surgencia de agua fría de capas más profundas hacia la superficie debido a la acción de los vientos del noreste.
- En cuanto a la variabilidad estacional e interanual de los datos de temperatura superficial del mar, se observa que de invierno a verano la temperatura en Luarca oscila en torno a 8.5°, alcanzando los 10° algunos años. En lo que respecta a la variación interanual, hay algunos años con el agua hasta 3° más cálida y otros en los que experimenta un enfriamiento de hasta 2.5°.
- En la costa del principado de Asturias en los últimos 30 se ha producido un incremento de casi 0.5°C en la temperatura superficial del agua del mar.

6. REFERENCIAS

- Bertin, X., E. Prouteau, and C. Letetrel, 2013. A significant increase in wave height in the North Atlantic Ocean over the 20th century, *Global and Planetary Change*, 106, 77–83.
- Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R., Tomas, A., y Izaguirre, C., 2013. High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas. *Coastal Engineering*, Vol. 72, pp 56-68.
- Camus, P. M. Menéndez, F.J. Méndez, C. Izaguirre, A. Espejo, V. Cánovas, J. Pérez, A. Rueda, I.J. Losada y R. Medina, 2014. A weather-type statistical downscaling framework for ocean wave climate. *Journal of Geophysical Research*, doi 10.1002/2014JC010141.
- Church, J. A., and N. J. White, 2006. A 20th century acceleration in global sea-level rise, *Geophysical Research Letters*, 33, L01602.
- Church, J.A., J.M. Gregory, N.J. White, S.M. Platten, y J.X. Mitrovica, 2011. Understanding and projecting sea level change. *Oceanography* 24(2), 130–143
- Cid, A., S. Castanedo, A.J. Abascal, M. Menendez and, R. Medina, 2014. A high resolution hindcast of the meteorological sea level component for Southern Europe: the GOS dataset. *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-013-2041-0.
- Gomis D, Ruiz S, Sotillo MG et al., 2008. Low frequency Mediterranean sea level variability: the contribution of atmospheric pressure and wind. *Global Planet Change* 63:215–229. doi:10.1016/j.gloplacha.2008.06.005
- Gulev, S.K. and Grigorieva, V., 2014. Last century changes in ocean wind wave height from global visual wave data. *Geophysical Research Letters*, 31, L24302.
- Marcos M., D. Gomis, S. Monserrat, E. Álvarez-Fanjul, B. Pérez y J. García-Lafuente, 2005. Consistency of long sea-level time series in the Northern coast of Spain. *Journal of Geophysical Research*, 110, C03008.
- Marcos M., M.N. Tsimplis y A.G.P. Shaw, 2009. Sea level extremes in southern Europe. *Journal of Geophysical Research*, 114, C01007.
- Pérez J., M. Méndez, M. Menéndez y I.J. Losada, 2014. ESTELA: a method for evaluating the source and travel time of the wave energy reaching a local area. *Ocean Dynamics*, DOI 10.1007/s10236-014-0740-7.
- Rasclé N., F. Ardhuin, P. Queffelec y D. Croizé-Fillon, 2008. A global wave parameter database for geophysical applications. Part 1: Wave–current–turbulence interaction parameters for the open ocean based on traditional parameterizations. *Ocean Model* 25(3–4), 154-171.
- Rasclé N., y F. Ardhuin, 2012. A global wave parameter database for geophysical applications. Part 2: Model validation with improved source term parameterization. *Ocean Model*. doi: 10.1016/j.ocemod.2012.12.001

Wang, X. L., Y. Feng, and V. R. Swail, 2012. North Atlantic wave height trends as reconstructed from the 20th century reanalysis, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L18705, doi: 10.1029/2012GL053381.



TAREA 2.2:

ANÁLISIS HISTÓRICO DE LA VULNERABILIDAD



1. INTRODUCCIÓN

El objeto de este documento es describir las bases de datos y la metodología empleadas para identificar el tejido socioeconómico afectado por el cambio climático en la costa asturiana. A tal efecto, se ha procedido a recabar la información disponible en las distintas fuentes estadísticas existentes que se presenta en apartados posteriores de este documento. Asimismo, y dado que se trata de evaluar las consecuencias de fenómenos diferidos a muy largo plazo, se ha considerado necesario estimar las características del tejido socioeconómico eventualmente afectado en el futuro, proyectando aquellas variables cuya evolución puede predecirse con verosimilitud.

2. BASES DE DATOS

Para llevar a cabo la caracterización del tejido socioeconómico presente y futuro en la costa asturiana se han utilizado diversas fuentes de información de población y de indicadores económicos como son el Valor Añadido Bruto (VAB), la Renta Disponible (RD) per cápita y el Stock de capital.

2.1. Población

El análisis de la distribución de la población se ha basado en los datos censales elaborados por el Instituto Nacional de Estadística (INE) para la Comunidad Autónoma de Asturias y para la distribución municipal. Dichos datos están disponibles en la página web de la Sociedad Asturiana de Estudios Económicos e Industriales (SADEI) y contemplan:

- Proyecciones de población según edad y diferenciando ambos sexos (total Asturias).
- Evolución de la población por concejos.

En base a estos datos y como análisis preliminar, se puede concluir lo siguiente:

1. Las proyecciones oficiales de población a 15 años pronostican un descenso continuado del 1% anual con un descenso total acumulado para 2029 del 9% de la población actual.
2. Las proyecciones a más largo plazo resultan dramáticas ya que en el primer escalón de edad, correspondiente a niños de 0 a 4 años, se estima para 2029 un descenso del 61%.
3. La distribución espacial de la población muestra una tendencia a la concentración en los grandes municipios urbanos del centro de Asturias y en algunos municipios costeros a costa de un fuerte decrecimiento de la población en el medio rural y urbano no costero.

2.2. Actividad económica

El análisis de la actividad económica se ha basado en los datos publicados por el INE en la Contabilidad Regional de España y en la de la SADEI. En concreto, se ha trabajado con el Valor Añadido Bruto (VAB) a precios básicos, tanto a escala regional como en su presentación desagregada por concejos, considerando:

- Evolución del VAB a precios básicos en Asturias.
- VAB a precios básicos según sectores económicos distribuido por concejos.
- Evolución del VAB a precios básicos 1980-2010 distribuido por concejos.
- VAB a precios básicos según sectores económicos distribución por concejos

De estos datos podemos extraer los siguientes resultados preliminares:

1. La tasa de crecimiento interanual del VAB per cápita se ha situado en el entorno del 2% presentando crecimientos del 2.5% real en los años 80 y del 1.7% entre 2001 y 2011.
2. El VAB regional ha mostrado un crecimiento en el entorno del 2% real.

3. La distribución espacial de la actividad se ha concentrado en los grandes municipios, en zonas costeras y hacia el oriente de la región. Así, el peso relativo de los municipios circundantes con Gijón ha experimentado un elevado crecimiento, quintuplicándose en el caso de Llanera (x5.2), o casi triplicándose en el caso de Carreño (x2.7) manteniendo cifras de crecimiento neto del peso relativo en Oviedo, Gijón, Llanes, Navia y Coaña.

2.3. Renta disponible por habitante

El análisis de la distribución de la renta se basa en las estimaciones realizadas por la SADEI, que elabora indicadores que caracterizan la distribución de la renta en diversos capítulos:

- Evolución de la renta familiar disponible ajustada neta por habitante según concejo.
- Cuenta de asignación de la renta primaria de los hogares según concejo.
- Cuenta de asignación de la renta secundaria de los hogares según concejo.
- Saldo de rentas primarias, renta disponible y renta disponible ajustada por habitante.

Como resultados preliminares podemos comprobar que en los últimos 30 años se ha producido una transferencia de bienestar de los grandes municipios urbanos, que son los grandes generadores de renta, hacia los municipios rurales equilibrándose así la distribución espacial de la renta. De esta forma, los municipios en los que la renta disponible per cápita ha disminuido en términos relativos a la media son Avilés, Gijón y Oviedo, Castrillón, Llanera y Noreña.

En cuanto a la evolución absoluta, se observa un crecimiento interanual que oscila entre el 2% y el 3% en términos reales.

Cabe destacar que este indicador resulta redundante como mero cuantificador de la afección generada pero resulta de gran utilidad a la hora de caracterizar el valor de los activos expuestos, y esto se debe a que la distribución de la renta disponible está fuertemente correlacionada con la distribución de la riqueza inmobiliaria. Asimismo, la resiliencia de las comunidades muestra una fuerte dependencia de la capacidad financiera de las mismas.

2.4. Stock de capital

El análisis del stock de capital de la comunidad autónoma asturiana se ha basado en los datos publicados por la fundación BBVA que, en el marco de su proyecto Capitalización y Crecimiento de la Economía Española, ha realizado una evaluación del valor de los activos económicos disponibles en cada provincia. Esta evaluación sigue las metodologías establecidas por la *Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE)* y presenta una valoración contable al coste originario y una valoración por estimación de los servicios prestados.

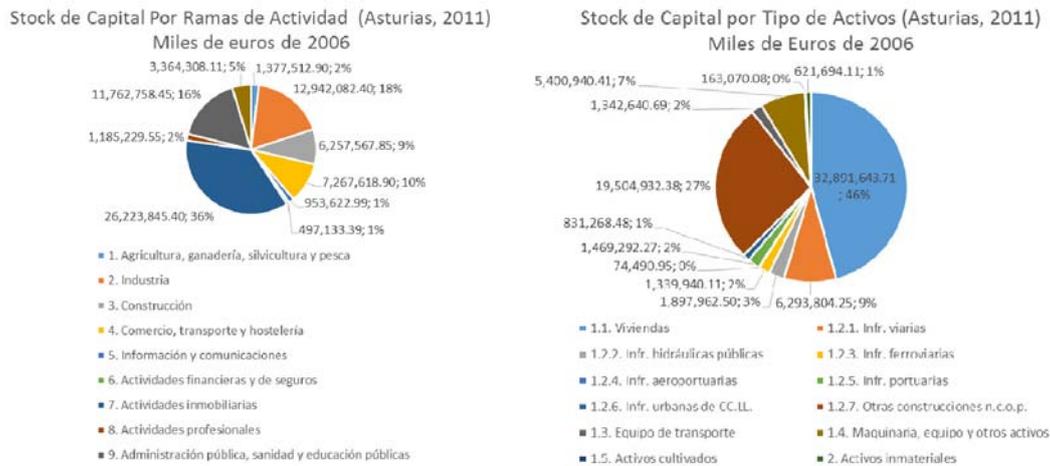


Figura 2.1. Stock de capital por ramas de actividad y tipos de activos

Los datos se presentan agregados por provincia y articulados, por un lado, por la naturaleza de los activos evaluados y, por otro, por la adscripción sectorial de los mismos. De esta forma contamos con una estimación de las infraestructuras públicas disponibles clasificadas en viarias, portuarias, ferroviarias o aeroportuarias. Asimismo, contamos con una valoración del capital inmobiliario disponible distribuido entre los sectores que disfrutan de sus servicios y con una valoración de los bienes de capital físico a disposición de los distintos sectores productivos, así como de los bienes de capital móvil (vehículos y maquinaria).

Esta información, que sirve de base para la estimación de la exposición y posteriormente del daño, requiere para su aplicación en nuestro trabajo de un análisis de criterios de imputación espacial.

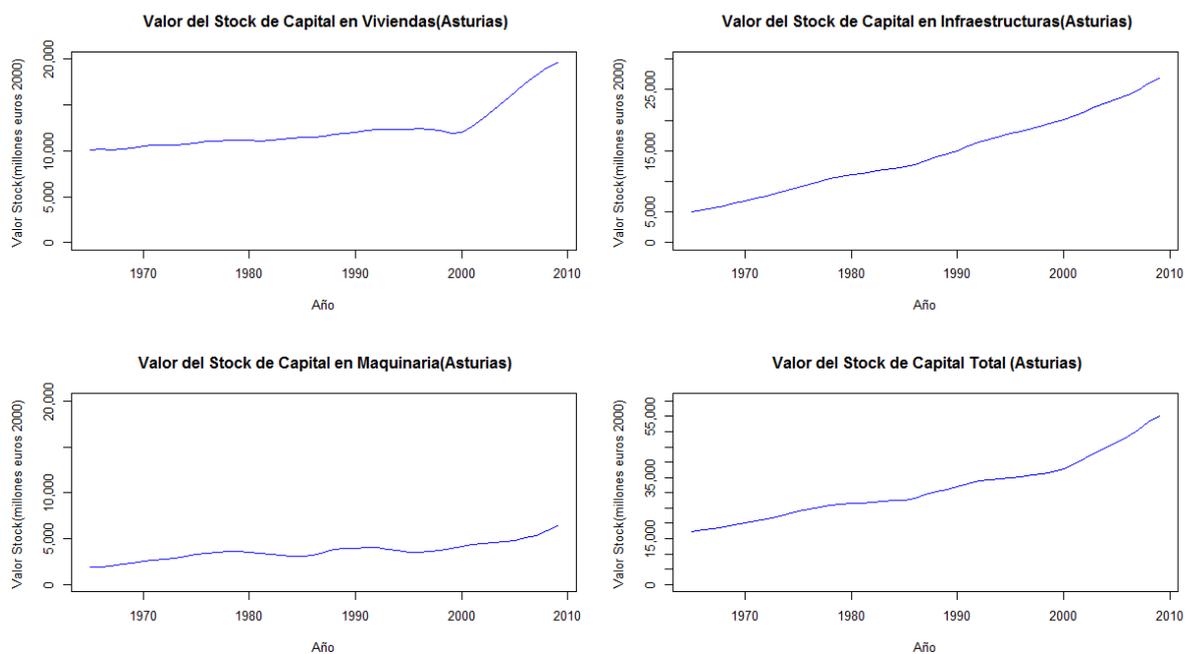


Figura 2.2. Evolución del valor del stock de capital por tipos de activos

Respecto a la distribución observada y para los distintos capítulos de stock de capital, se puede observar en la gráfica adjunta cómo el crecimiento temporal de los capítulos inversores se distribuye de manera irregular presentando las siguientes características:

- El valor del stock de capital en vivienda muestra claramente una inflexión en el año 2000, pasando de un periodo de 35 años con un crecimiento del 0.4% anual acumulativo a un periodo de 15 años con un crecimiento promedio del 3.3% en términos reales. Por otro lado, cabe explicar el crecimiento del stock de viviendas por cuatro motivos: el realojamiento de población, la aparición de segundas viviendas, las mejoras de las existentes y las posibles inversiones especulativas.
- El valor del stock de capital productivo en maquinaria ha venido creciendo a razón del 2.5% anual acumulativo real, con una tendencia sostenida continua.
- El valor del stock de infraestructuras ha venido creciendo a razón del 3.5% acumulativo, si bien las grandes inversiones en Pajares, El Puerto de Gijón, el AVE y el aeropuerto han supuesto un episodio difícilmente repetible en el marco de las previsiones demográficas actuales.
- En conjunto, se observa un crecimiento acumulado del stock de capital del orden del 2.4% anual acumulativo, resultante del promedio de los crecimientos observados

3. METODOLOGÍA

La metodología propuesta en el presente documento, de acuerdo con los modelos analíticos habituales, plantea el impacto de los efectos por cambio climático a través de dos categorías de indicadores: exposición y vulnerabilidad.

3.1. Exposición

Se ha procedido a la realización de un *downscaling* espacial con el fin de imputar aquellas variables agregadas de que disponemos en su localización más verosímil a través del uso de indicadores auxiliares que caractericen la distribución espacial con una mínima precisión.

En primer lugar se han compilado las estadísticas existentes que presentan las distintas magnitudes a diferentes escalas de agregación espacial y sectorial. En ese punto, se ha contado con una serie de atributos monetarios en forma de stocks localizados en el espacio junto con flujos generados en el mismo. Dada la heterogeneidad de los datos a causa de su agregación espacial y sectorial, se ha requerido la utilización de una serie de instrumentos de imputación. Se trata de magnitudes auxiliares que se correlacionan con los valores monetarios disponibles que se encuentran a escala espacial menor y permiten apoyar la distribución. Para llevar a cabo este proceso, es necesario fijar una serie de hipótesis sobre el comportamiento espacial y sectorial de los agregados económicos, las cuales han sido descritas en la columna correspondiente de la figura 3.1. De esta forma, se introduce en el modelo una hipótesis de equidistribución del stock de viviendas en el medio urbano, o del stock de capital productivo industrial en el suelo industrial, lo que permite aquilatar el valor previsto con mayor grado de detalle.

Finalmente, se cuenta con una serie de indicadores que corrigen la estimación anterior tratando de capturar efectos derivados de la distribución espacial. Por ejemplo, una vez fijada la hipótesis de que el VAB inmobiliario por Ha de suelo urbano es constante, se pasa a corregir el dato considerando que la presencia de sociedades con un distinto nivel de renta permite asumir que la calidad y valor de las viviendas sea distinta. Esto se consigue mediante la corrección del valor del capital inmobiliario expuesto en función de la comparación entre la renta per cápita del municipio y la renta per cápita media de Asturias. En el caso de producción se emplean la especialización sectorial de los municipios, el empleo sectorial o la productividad. Esencialmente, este segundo paso no es distinto del anterior aunque sea presentado como un refinamiento del cálculo.

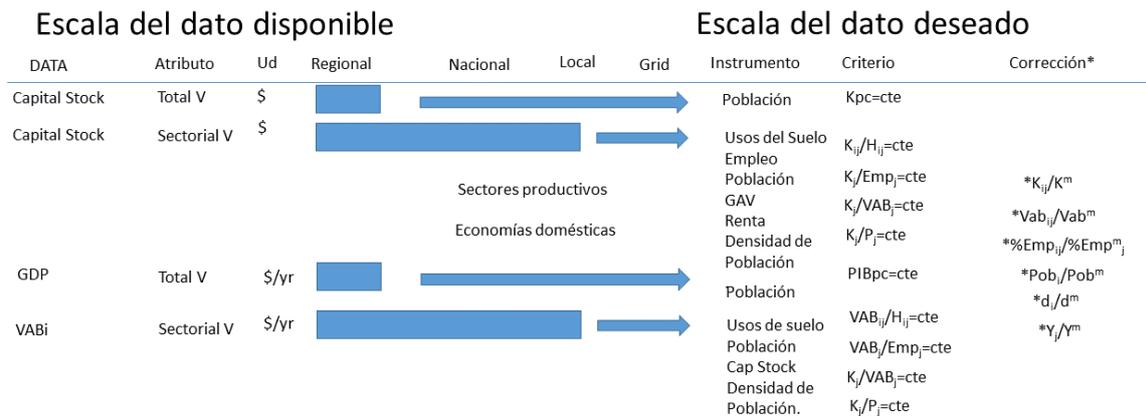


Figura 3.1. Desagregación de los indicadores expuestos

3.2. Vulnerabilidad. Aplicación de funciones de daño

Una vez caracterizado el escenario expuesto a los efectos del cambio climático, se ha procedido a evaluar el impacto que dichos cambios tienen sobre las variables expuestas. Para ello, y en función de la naturaleza de los datos, son de aplicación las siguientes metodologías:

Para caracterizar el daño sobre los stocks de capital existentes en el medio expuesto, se van a emplear las funciones de daño que expresan el porcentaje de daño en función del riesgo a que nos enfrentamos. A tal efecto, se han escogido las funciones del modelo Hazus (véase la figura 3.2) seleccionando de entre ellas aquellas que mejor describen las circunstancias. En el caso del daño sobre el stock de capital productivo, se van a emplear las funciones promedio recomendadas para la industria ligera proporcionadas por la misma fuente. Finalmente, para las infraestructuras, se va a abordar un tratamiento distintivo que permite correlacionar directamente el porcentaje de daño con el periodo de retorno de la afección descrita.

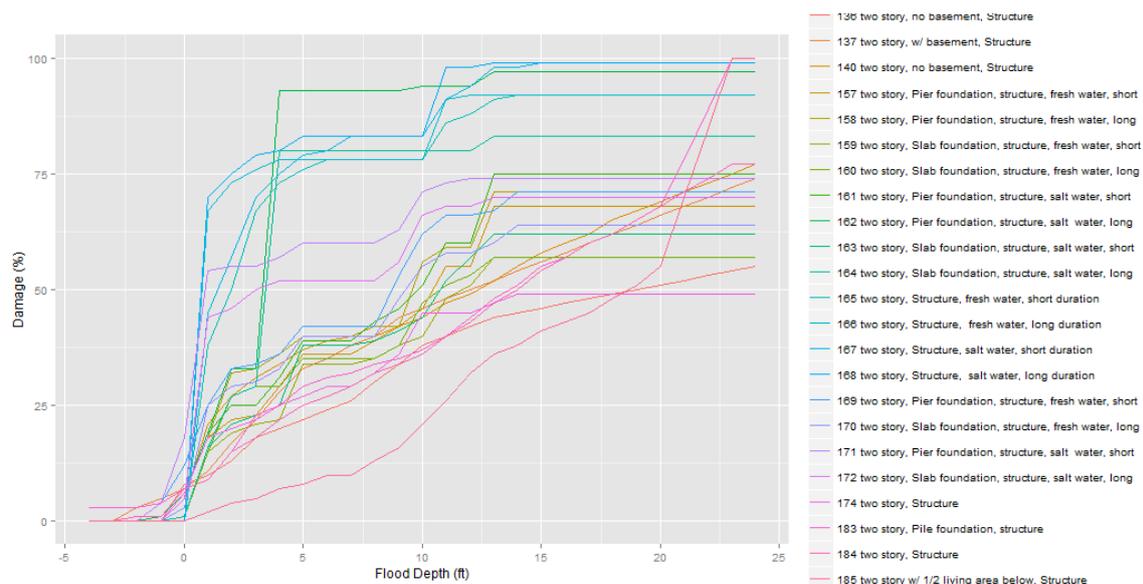


Figura 3.2. Inventario de funciones de daño de Hazus (Gopi Goteti, 2014)

Con el fin de analizar el daño sobre los flujos de actividad, se debe garantizar, en primer lugar, que no se está realizando una doble contabilización de daños, y a tal efecto se mantendrá el daño emergente, es decir, destrozos y reparaciones en el capítulo del daño sobre el stock, y el lucro cesante en el capítulos del impacto de los flujos. Se requiere estimar una duración del evento así como un ritmo de recuperación. Para ello, es necesario ajustar una función exponencial (ecuación 3.1) que depende del tiempo y del impacto relativo de la inundación, y sobre ella, se calcula una duración equivalente que ha sido definida como el número de días de pérdida total de actividad y que equivale a la pérdida total acumulada.

$$Ae^{-k\left(1-\frac{Vaf}{Vtot}\right)ct} \quad (3.1)$$

A partir de la comparación de la renta per cápita media de Asturias y la renta de cada municipio se va a proceder con la realización de una comprobación sobre la pérdida de bienestar ocasionado. Para ello, se va a corregir el valor de las pérdidas ocasionadas con el valor de la utilidad marginal de la renta de cada municipio (Y), basada en la relación entre su renta media y la renta media de Asturias (ecuación 3.2).

$$U = \log(\gamma) \quad (3.2)$$

$$\frac{d}{d\gamma} U(\gamma) = \frac{1}{\gamma} \quad (3.3)$$

De esta forma un incremento o reducción del bienestar percibido o sufrido por un sujeto al experimentar una ganancia o pérdida es inversamente proporcional a su nivel de renta y en consecuencia una pérdida sufrida por un sujeto de renta superior a la media implica una pérdida de bienestar menor que si esa pérdida es sufrida por un sujeto cuya renta es inferior a la media.

El objetivo de este cálculo es identificar los eventuales efectos redistributivos espaciales de los impactos de cambio climático más que obtener un indicador de bienestar que podría ser de difícil comprensión

4. RESULTADOS

En base a las observaciones realizadas, se han elaborado los escenarios tendenciales que se presentan a continuación.

4.1. Población

De acuerdo con las estimaciones proyectadas, resulta evidente que el pronóstico de población debe basarse en una hipótesis de estancamiento, sin embargo, lo drástico de los cambios observados impide asumirlos como una característica estructural ya que una reducción de población tan acusada parece invitar al desarrollo de medidas correctoras o al cambio en el comportamiento demográfico de la población. Se estima en Asturias, por tanto, una reducción de la población al ratio proyectado del 1% anual hasta 2050, manteniéndose constante posteriormente. La distribución espacial se estimará de acuerdo con las tendencias de concentración observadas hasta la fase de estabilidad.

4.2. Valor añadido bruto (VAB)

En consonancia con las observaciones realizadas, se prevén cifras futuras estimadas del 1.5% de crecimiento real. Somos conscientes de que el acusado descenso demográfico alterará profundamente la estructura de la sociedad asturiana, sin embargo, la inexistencia de previsiones sobre el comportamiento migratorio, o sobre eventuales ciclos de transición a la estabilidad demográfica nos lleva estimar que, aunque el decrecimiento continuará durante al menos dos décadas, el VAB podrá seguir creciendo gracias al aumento de la productividad en el entorno del 1% real.

4.3. Renta familiar disponible

En línea con lo observado, se estima un crecimiento medio de la RFD del 1% anual acumulativo en términos reales. De nuevo recalcar que los indicadores de renta por habitante resultan fuertemente condicionados por la distribución demográfica estimada cuyas características ya han sido descritas como delicadas.

4.4. Stock de capital

De acuerdo con las observaciones efectuadas, se proponen las siguientes estimaciones del comportamiento de las variables representativas del stock de capital:

- Para el stock de capital de viviendas, se estima un crecimiento del parque de viviendas moderado del 0.5% ligado fundamentalmente a la aparición y renovación de segundas viviendas y a la relocalización de población en los municipios que han mostrado dinamismo demográfico relativo.
- Para el valor del stock de capital productivo en maquinaria, ligado a actividades productivas, se estima un crecimiento del 1.25% anual acumulativo condicionado por la renovación del existente a su agotamiento, por la tercerización esperable de la economía y por una dinámica económica lastrada por la falta de dinamismo demográfico.
- Para el stock de capital de infraestructuras, las conclusiones son semejantes a las citadas para otros capítulos, y se estima un crecimiento homogéneo del 2% ligado a la reposición y mejora de las infraestructuras existentes.

5. CONCLUSIONES

El estudio descrito en este documento ha requerido un trabajo complejo centrado en recabar y manipular bases de datos de diversas fuentes, con distinto nivel de agregación espacial y funcional, y su manipulación y tratamiento para hacer aflorar la imagen del tejido socioeconómico necesaria para visibilizar las magnitudes y efectos deseados. En consecuencia agruparemos nuestras conclusiones en tres capítulos, sobre documentación y datos, sobre metodología y tratamiento y sobre resultados obtenidos.

5.1. Bases de datos

Tal y como se ha indicado, para caracterizar el tejido socioeconómico ha sido necesario disponer de la siguiente información:

- Proyecciones de población según edad y diferenciando ambos sexos (total Asturias) y evolución de la población por concejos.
- Evolución del VAB a precios básicos en Asturias, VAB a precios básicos según sectores económicos distribuido por concejos, evolución del VAB a precios básicos 1980-2010 distribuido por concejos y VAB a precios básicos según sectores económicos y su distribución por concejos.
- Evolución de la renta familiar disponible ajustada neta por habitante según concejo, cuenta de asignación de la renta primaria de los hogares según concejo, cuenta de asignación de la renta secundaria de los hogares según concejo y saldo de rentas primarias, renta disponible y renta disponible ajustada por habitante.
- Stock de capital por ramas de actividad y tipos de activos en Asturias.

El análisis de los datos recopilados ha permitido extraer las siguientes conclusiones:

- Las proyecciones oficiales de población a 15 años pronostican un descenso continuado del 1% anual con un descenso total acumulado para 2029 del 9% de la población actual. Las proyecciones a más largo plazo resultan dramáticas ya que se estima para 2029 un descenso del 61% de niños de 0 a 3 años.
- La distribución espacial de la población muestra una tendencia a la concentración en los grandes municipios urbanos del centro de Asturias y en algunos municipios costeros.
- La tasa de crecimiento interanual del VAB per cápita se ha situado en el entorno del 2% presentando crecimientos del 2.5% real en los años 80 y del 1.7% entre 2001 y 2011.
- El VAB regional ha mostrado un crecimiento en el entorno del 2% real.
- La distribución espacial de la actividad se ha concentrado en los grandes municipios, en zonas costeras y hacia el oriente de la región. Así, el peso relativo de los municipios circundantes con Gijón ha experimentado un elevado crecimiento, quintuplicándose en el caso de Llanera (x5.2), o casi triplicándose en el caso de Carreño (x2.7) manteniendo cifras de crecimiento neto del peso relativo en Oviedo, Gijón, Llanes, Navia y Coaña.

- En los últimos 30 años se ha producido una transferencia de bienestar de los grandes municipios urbanos, que son los grandes generadores de renta, hacia los municipios rurales equilibrándose así la distribución espacial de la renta. Así, los municipios en los que la renta disponible per cápita ha disminuido en términos relativos a la media son Avilés, Gijón y Oviedo, Castrillón, Llanera y Noreña.
- Se observa un crecimiento interanual de la renta disponible por habitante que oscila entre el 2% y el 3% en términos reales.
- El valor del stock de capital en vivienda muestra claramente una inflexión en el año 2000, entre un periodo de 35 años con un crecimiento del 0.4% anual acumulativo y un periodo de 15 años con un crecimiento promedio del 3.3% en términos reales. Esto se debe al realojamiento de población, a la aparición de segundas viviendas, a las mejoras de las existentes y a las posibles inversiones especulativas.
- El valor del stock de capital productivo en maquinaria ha venido creciendo a razón del 2.5% anual acumulativo real, con una tendencia sostenida continua.
- El valor del stock de infraestructuras ha venido creciendo a razón del 3.5% acumulativo, si bien las grandes inversiones en Pajares, El Puerto de Gijón, el AVE y el aeropuerto han supuesto un episodio difícilmente repetible en el marco de las previsiones demográficas actuales.
- En conjunto, se observa un crecimiento acumulado del stock de capital del orden del 2.4% anual acumulativo, resultante del promedio de los crecimientos observados

5.2. Metodología

La metodología propuesta plantea el impacto del cambio climático a través de dos categorías de indicadores: exposición y vulnerabilidad. A continuación se presentan los puntos clave:

- Se ha realizado un *downscaling* espacial con el fin de imputar aquellas variables agregadas de que disponemos a través del uso de indicadores auxiliares que correlacionan con valores monetarios disponibles a escala espacial menor y que permiten apoyar la distribución. En el modelo se introducen diversas hipótesis de equidistribución y una serie de indicadores que corrigen la estimación anterior tratando de capturar efectos derivados de la distribución espacial.
- La valoración de activos y a partir de una fuente macroeconómica tiene la ventaja de que nos proporciona órdenes de magnitud coherentes que, aunque no nos garantiza la precisión máxima a escala local, sí que nos permite proporcionar un promedio robusto. Los resultados extraídos no deben, por tanto, ser contrastados a micro-escala.
- Para caracterizar el daño sobre los stocks de capital existentes en el medio expuesto se han empleado las funciones de daño del modelo Hazus, que expresan el porcentaje de daño en función del riesgo a que nos enfrentamos.

5.3. Resultados

En base a los resultados obtenidos sobre la evolución temporal de las magnitudes elegidas para caracterizar el espacio de estudio se han podido extraer las siguientes conclusiones que conforman los escenarios de análisis:

- Se estima en Asturias una reducción de la población al ratio proyectado del 1% anual hasta 2050, manteniéndose constante posteriormente.
- Aunque el decrecimiento continuará durante al menos dos décadas, el VAB podrá seguir creciendo gracias al aumento de la productividad en el entorno del 1% real.
- Se estima un crecimiento medio de la renta de los hogares del 1% anual acumulativo en términos reales.
- Se estima un crecimiento del parque de viviendas moderado del 0.5% ligado fundamentalmente a la aparición y renovación de segundas viviendas y a la relocalización de población en los municipios que han mostrado dinamismo demográfico relativo.
- Para el valor del stock de capital productivo en maquinaria, ligado a actividades productivas, se estima un crecimiento del 1.25% anual acumulativo condicionado por la renovación del existente a su agotamiento, por la tercerización esperable de la economía y por una dinámica económica lastrada por la falta de dinamismo demográfico.
- Para el stock de capital de infraestructuras, se estima un crecimiento homogéneo del 2% ligado a la reposición y mejora de las infraestructuras existentes.

6. REFERENCIAS

Fundación BBVA: www.fbba.es (último acceso: marzo de 2015).

Gobierno del Principado de Asturias: www.asturias.es (último acceso: marzo de 2015).

Gopi Goteti, 2014. R Package: Hazus. Damage functions from FEMA'S HAZUS software for use in modeling financial losses from natural disasters. Version 0.1.

Instituto Nacional de Estadística (INE): www.ine.es (último acceso: marzo de 2015).

Sociedad Asturiana de Estudios Económicos e Industriales (SADEI): www.sadei.es (último acceso: Julio de 2015).



TAREA 2.3:

PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO DE DINÁMICAS MARINAS



1. INTRODUCCIÓN

La adaptación al cambio climático requiere la evaluación del riesgo bajo distintos escenarios con el objetivo de valorar los futuros cambios y proponer medidas o estrategias de adaptación que permitan lograr unos objetivos de riesgo (mantener el riesgo presente, disminuirlo, etc). Para ello es necesario trabajar con escenarios basados en proyecciones, tanto climáticas como socioeconómicas.

Este informe se centra en el análisis de las proyecciones de cambio climático de las dinámicas marinas con el objetivo de poder plantear, posteriormente, escenarios para el análisis del riesgo en la costa de Asturias. Adicionalmente se analiza la evolución de la temperatura superficial del agua en la zona costera para cada uno de los escenarios proyectados, dada su relevancia para los ecosistemas que alberga.

El objetivo principal es, por tanto, analizar las proyecciones de oleaje, nivel del mar y temperatura para distintos escenarios climáticos basados en rutas representativas de concentración (RCP de sus siglas en inglés) de gases de efectos invernadero (GEIs). En la actualidad existen cuatro escenarios RCP con los que trabaja la comunidad científica. Cada uno de ellos representa distintas evoluciones de las concentraciones de GEIs a lo largo del siglo XXI, así el RCP2.6 representa un escenario optimista con bajas concentraciones de GEIs, los escenarios RCP4.5 y RCP6.0 representan escenarios moderados con concentraciones de GEIs que se estabilizan antes (RCP4.5) y después (RCP6.0) del año 2100 y por último, el RCP8.5 representa un escenario pesimista con altas concentraciones de GEIs.

En este estudio se van a estimar las proyecciones de oleaje, nivel del mar y temperatura para los RCP4.5 y RCP8.5, que representan un escenario moderado y pesimista de emisiones de GEIs. Para estimar las proyecciones de oleaje y marea meteorológica se va a utilizar una metodología basada en tipos de tiempo (Camus et al. 2014), también aplicada al análisis de las tendencias históricas. Para ello, se va a hacer uso de las salidas de los modelos globales atmosféricos CMIP5, los cuales van a ser analizados y seleccionados previamente comprobando su pericia. En el caso del nivel medio del mar, se utilizarán proyecciones regionalizadas a la costa asturiana de ambos escenarios.

2. METODOLOGÍA

2.1. Análisis de las dinámicas marinas

2.1.1. Oleaje y marea meteorológica

La metodología de *downscaling* estadístico basada en tipos de tiempo y aplicada al análisis de tendencias históricas de dinámicas marinas (descrita en el informe de la Tarea 2.1) es aplicada aquí para obtener las proyecciones de cambio climático del oleaje y la marea meteorológica.

La metodología de *downscaling* estadístico trata de establecer una relación estadística entre el predictor (campos de presiones a nivel del mar) y el predictando (oleaje o marea meteorológica). Una vez conocida esa relación, mediante el uso y entrenamiento del modelo en el período histórico, se pueden obtener las proyecciones del predictando a partir de los cambios en las probabilidades del predictor, ya que la relación estadística de cada tipo de tiempo se asume constante.

La metodología se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Recolección histórica de datos del predictor y del predictando.
2. Definición del predictor basada en las características de generación del oleaje local utilizando el método ESTELA (Pérez et al. 2014a).
3. Definición del modelo estadístico para el predictando.
4. Análisis de los GCMs (modelos climáticos globales) y las probabilidades futuras de ocurrencia de los tipos de tiempo para distintos escenarios de cambio climático.
5. *Downscaling* estadístico del oleaje y marea meteorológica obteniendo las proyecciones de las dinámicas para los escenarios de cambio climático.

Una descripción más completa de la metodología se puede encontrar en Camus et al. (2014), y en el informe de la Tarea 2.1 donde se muestra la aplicación de los tres primeros puntos. Por esta razón, aquí vamos a centrarnos principalmente en la descripción de los puntos 4 y 5 de la metodología. Sin embargo, para centrar la metodología y no dejar cabos sueltos, vamos a describir muy brevemente los puntos 1, 2 y 3.

Se considera como predictor los campos de presiones y el gradiente de presión a nivel del mar, tomados de la base de datos de reanálisis CFRS en el período 1979-2010 (lo que llamaremos período de control). En cuanto al predictando, se van a considerar, por un lado el oleaje, utilizando la base de datos DOW (Camus et al. 2013) de oleaje propagado hasta la costa, y por otro, la marea meteorológica, para la que se utilizarán los datos del reanálisis GOS (Cid et al. 2014).

Utilizando el método ESTELA se ha definido el área del predictor y la cobertura temporal a tener en cuenta (3 días) y, a partir de los datos del predictor en esta zona y aplicando técnicas de minería de datos se ha obtenido una clasificación de 100 tipos de tiempo representativos de la atmósfera representados en una rejilla con criterios de visualización (véase la figura 2.1). Esta clasificación en 100 tipos de tiempo es la misma que la utilizada en la estimación de las tendencias históricas de las dinámicas.

Proyectando el predictando sobre la rejilla de tipos de tiempo se obtiene, para cada uno de ellos, la distribución estadística de los parámetros del oleaje y marea meteorológica, siendo ésta la relación estadística que se asume invariante a lo largo del tiempo.

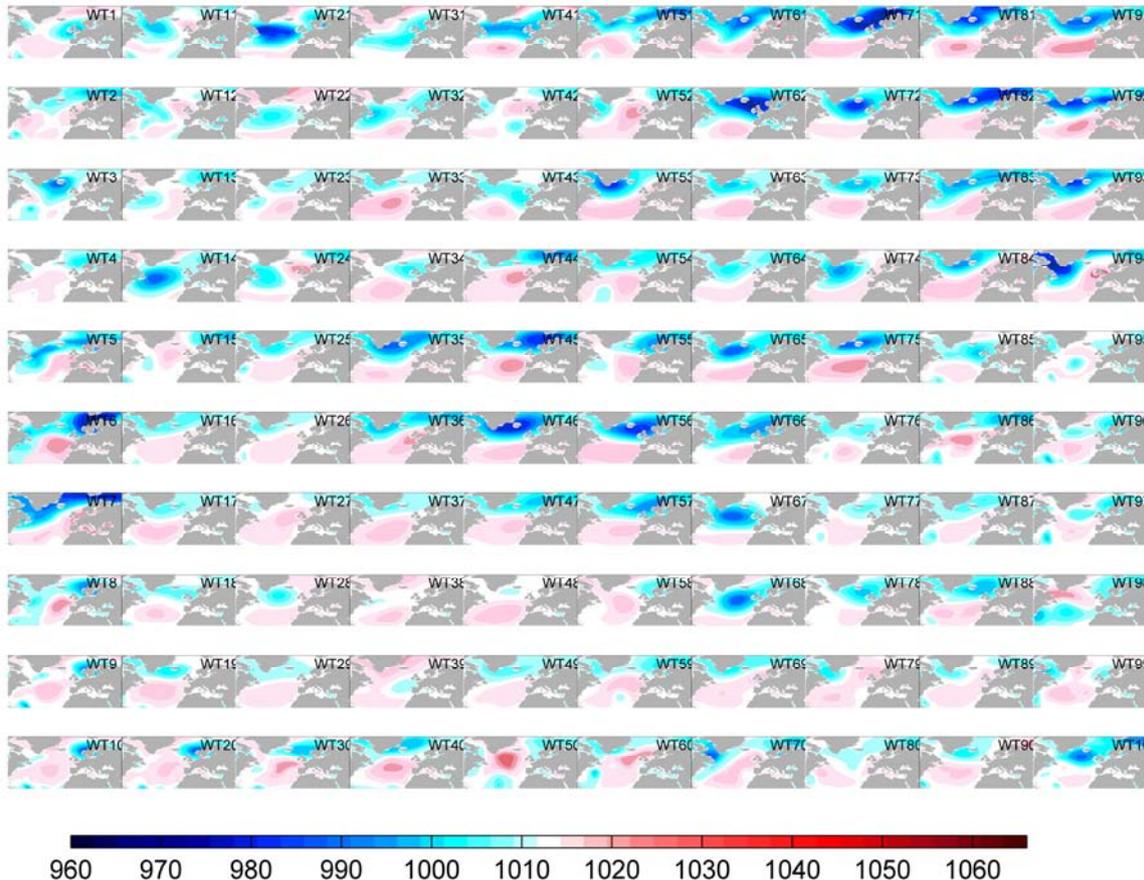


Figura 2.1. Representación de los 100 tipos de tiempo obtenidos para el predictor de Asturias

A continuación se describen más detalladamente los puntos 4 y 5 de la metodología.

Análisis de los GCMs y las probabilidades futuras de ocurrencia de los tipos de tiempo bajo distintos escenarios de cambio climático

Una vez conocida la relación estadística entre predictor y predictando y asumiendo ésta constante en el tiempo, el input del modelo estadístico para poder proyectar las dinámicas al futuro serán las nuevas condiciones atmosféricas, o dicho de otro modo, las nuevas probabilidades de ocurrencia.

El modo en que se comportará la atmósfera bajo distintos escenarios de cambio climático se obtiene mediante la ejecución de modelos climáticos globales (GCM de sus siglas en inglés). Los GCMs simulan el comportamiento de la atmósfera, los océanos, la superficie terrestre y la criosfera a lo largo del planeta. Desde el primer informe de evaluación del IPCC en 1990, los GCMs han sido una de las mayores fuentes de información para el análisis del clima. Las variables geofísicas que obtienen estos modelos se calculan en una malla tridimensional de resolución espacial en torno a 100-400 km y mediante distintas capas en profundidad en los océanos y en altura en la atmósfera, dependiendo del modelo. Las salidas de los GCMs son utilizadas ampliamente en muchos estudios para

entender los cambios en las dinámicas del clima y, como en este caso, sirven de base para determinar, mediante un *downscaling* estadístico el oleaje y marea meteorológica, que son variables que estos modelos no simulan directamente.

Diferentes instituciones investigadoras desarrollan y mantienen sus propios GCMs. El conjunto más actual de modelos climáticos utilizados se incluye en la quinta fase del proyecto Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5, Taylor et al. 2012). La tabla 2.1 muestra los nombres de los modelos que han sido usados así como los grupos de investigación y países a los que pertenecen, la resolución atmosférica y el número de simulaciones futuras analizadas (*runs*).

Model	Institution	Country	Atmospheric resolution (lat × lon, number of layers)	Runs RCP2.6—RCP4.5—RCP6.0—RCP8.5-
ACCESS1.0	CSIRO-BOM	Australia	1.25° × 1.9°, L38	0-1-0-1
ACCESS1.3	CSIRO-BOM	Australia	1.25° × 1.9°, L38	0-1-0-1
BCC-CSM1.1	Beijing Climate Center	China	2.8° × 2.8°, L26	1-1-1-1
BCC-CSM1.1(m)	Beijing Climate Center	China	1.12° × 1.12°, L26	1-1-1-1
BNU-ESM	College of Global Change and Earth System Science	China	2.8° × 2.8°, L26	1-1-0-1
CanCM4	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	Canada	2.8° × 2.8°, L35	0-10-0-0
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	Canada	2.8° × 2.8°, L35	5-5-0-5
CCSM4	National Center for Atmospheric Research	USA	0.94° × 1.25°, L26	3-3-3-3
CESM1(BGC)	Community Earth System Model Contributors	USA	0.94° × 1.25°, L26	0-1-0-1
CESM1(CAM5)	Community Earth System Model Contributors	USA	0.94° × 1.25°, L26	1-1-1-1
CESM1(FASTCHEM)	Community Earth System Model Contributors	USA	0.94° × 1.25°, L26	0-0-0-0
CMCC-CESM	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	Italy	3.71° × 3.75°, L39	0-0-0-1
CMCC-CM	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	Italy	0.75° × 0.75°, L31	0-1-0-1
CMCC-CMS	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	Italy	1.9° × 1.9°, L95	0-1-0-1
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques	France	1.4° × 1.4°, L31	1-1-1-1
CSIRO-Mk3.6.0	CSIRO-QCCCE	Australia	1.9° × 1.9°, L18	10-10-10-10
EC-EARTH	EC-EARTH consortium	Various	1.1° × 1.1°, L62	1-5-0-5
FGOALS-g2	LASG-CESS	China	2.8° × 2.8°, L26	1-1-0-1
FGOALS-s2	LASG-CESS	China	1.7° × 2.8°, L26	1-0-1-3
GFDL-CM3	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA	2° × 2.5°, L48	1-0-1-1
GFDL-ESM2G	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA	2° × 2.5°, L48	1-1-1-1
GFDL-ESM2 M	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA	2° × 2.5°, L48	1-1-1-1
GISS-E2-H	NASA Goddard Institute for Space Studies	USA	2° × 2.5°, L40	0-0-0-0
GISS-E2-R	NASA Goddard Institute for Space Studies	USA	2° × 2.5°, L40	0-2-0-0
HadCM3	Met Office Hadley Centre	UK	2.5° × 3.75°, L19	0-10-0-0
HadGEM2-AO	Met Office Hadley Centre	UK	1.25° × 1.9°, L38	1-1-1-0
HadGEM2-CC	Met Office Hadley Centre	UK	1.25° × 1.9°, L60	0-1-0-3
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre	UK	1.25° × 1.9°, L38	4-4-4-3
INM-CM4	Institute for Numerical Mathematics	Russia	1.5° × 2°, L21	0-1-0-1
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace	France	1.9° × 3.75°, L39	4-4-1-4
IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre-Simon Laplace	France	1.25° × 2.5°, L39	1-1-1-1
IPSL-CM5B-LR	Institut Pierre-Simon Laplace	France	1.9° × 3.75°, L39	0-1-0-1
MIROC-ESM	MIROC	Japan	2.8° × 2.8°, L80	1-1-1-1
MIROC-ESM-CHEM	MIROC	Japan	2.8° × 2.8°, L80	1-1-1-1
MIROC4 h	MIROC	Japan	0.56° × 0.56°, L56	0-3-0-0
MIROC5	MIROC	Japan	1.4° × 1.4°, L40	3-3-1-3
MPI-ESM-LR	Max-Planck-Institut für Meteorologie	Germany	1.9° × 1.9°, L47	3-3-0-3
MPI-ESM-MR	Max-Planck-Institut für Meteorologie	Germany	1.9° × 1.9°, L95	1-1-0-0
MPI-ESM-P	Max-Planck-Institut für Meteorologie	Germany	1.9° × 1.9°, L47	0-0-0-0
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute	Japan	1.1° × 1.1°, L48	0-0-0-0
MRI-ESM1	Meteorological Research Institute	Japan	1.1° × 1.1°, L48	0-0-0-0
NorESM1-M	Norwegian Climate Centre	Norway	1.9° × 2.5°, L26	0-0-0-0

Tabla 2.1. Nombres de los GCMs del CMIP5, instituciones, países, resolución y runs.

Como se desprende de la tabla 2.1 hay un amplio número de modelos con diferentes características, que dan resultados diferentes para los mismos escenarios climáticos. Esto no quiere decir que unos sean mejores que otros, pero sí que unos tienen mayor pericia y son capaces de representar el clima más fielmente que otros. Para saber qué modelos son los más adecuados a la hora de modelar el clima futuro y quedarnos con las salidas de éstos, se ha seguido el estudio de Pérez et al. (2014b) en el que, mediante el uso de una clasificación sinóptica basada en tipos de tiempo, determina qué modelos son los que mejor reproducen la variabilidad climática (estacionalidad y variabilidad interanual) y los patrones sinópticos de gran escala en el Atlántico Norte. En base a su estudio se han considerado los 40 modelos mejor valorados (véase la figura 2.2) para alimentar el modelo estadístico que permite obtener las proyecciones de las dinámicas marinas. Cada uno de estos modelos proporciona unas condiciones futuras del clima para los escenarios a considerar (es decir, 40 situaciones futuras), por lo que para poder trabajar con unas únicas condiciones por escenario, se hará una combinación (*ensemble*) de todos los modelos ponderándolos a todos por igual.

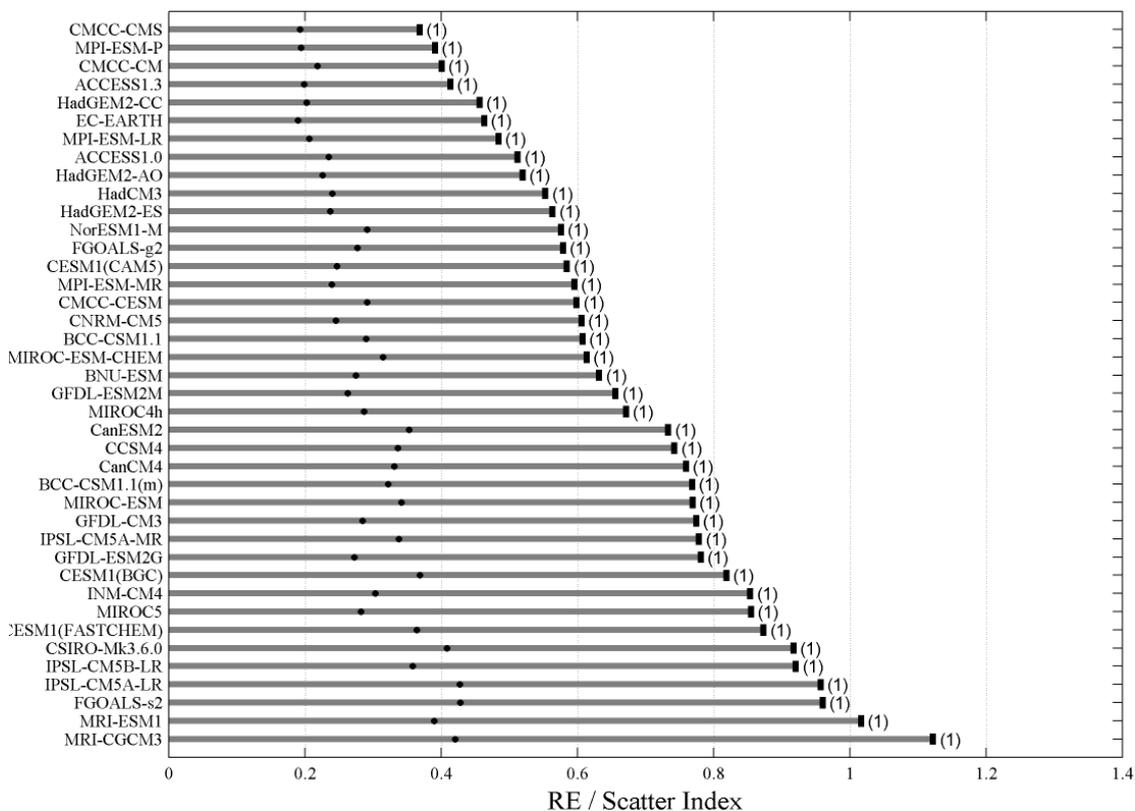


Figura 2.2. Ranking de los GCMs

Una vez conocidos los modelos a utilizar y los escenarios climáticos es necesario fijar unos períodos de tiempo futuros en los que proyectar las dinámicas. Se ha dividido el siglo XXI en tres períodos de tiempo de 30 años cada uno (el tiempo considerado por los expertos para un período climático): 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099. En cada uno de estos períodos de tiempo y para los dos escenarios RCP elegidos se han obtenido las nuevas probabilidades de ocurrencia de los 100 tipos de tiempo clasificados. Esto es, los futuros campos de presiones se transforman al espacio de las funciones empíricas

ortogonales (EOFs de sus siglas en inglés) y se proyectan sobre la rejilla de tipos de tiempo. De esta manera, habrá tipos de tiempo que en el futuro ocurrirán más o menos veces, variando así su probabilidad de ocurrencia. Para un escenario (por ejemplo RCP4.5) y un horizonte temporal (por ejemplo el período 2040-2069) se obtienen las 100 futuras probabilidades de los 40 modelos globales, con los que se hace una media obteniendo las 100 futuras probabilidades del *ensemble* de modelos. Teniendo en cuenta que el período de control es el período 1979-2013, podremos obtener los cambios en las probabilidades para cada tipo de tiempo, que es la información necesaria para obtener las proyecciones y cambios en las dinámicas.

Siguiendo la metodología descrita se han obtenido los cambios en la probabilidad de ocurrencia para los 100 tipos de tiempo en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 y los tres períodos del siglo XXI (véase la figura 2.3). Se puede observar como los tipos de tiempo WT27, WT37, WT47 y WT57 presentan una mayor probabilidad de ocurrencia en todos los periodos de tiempo y para los dos escenarios de cambio climático considerados. Estos tipos de tiempo son los más frecuentes en verano, especialmente el WT37. Por el contrario, tipos de tiempo representativos de intensas bajas presiones sobre el Atlántico Norte, por ejemplo WT45 y WT55, se estima que sean menos frecuentes en el futuro. Por tanto, se espera que las dinámicas sufrirán una disminución de su magnitud en el futuro.

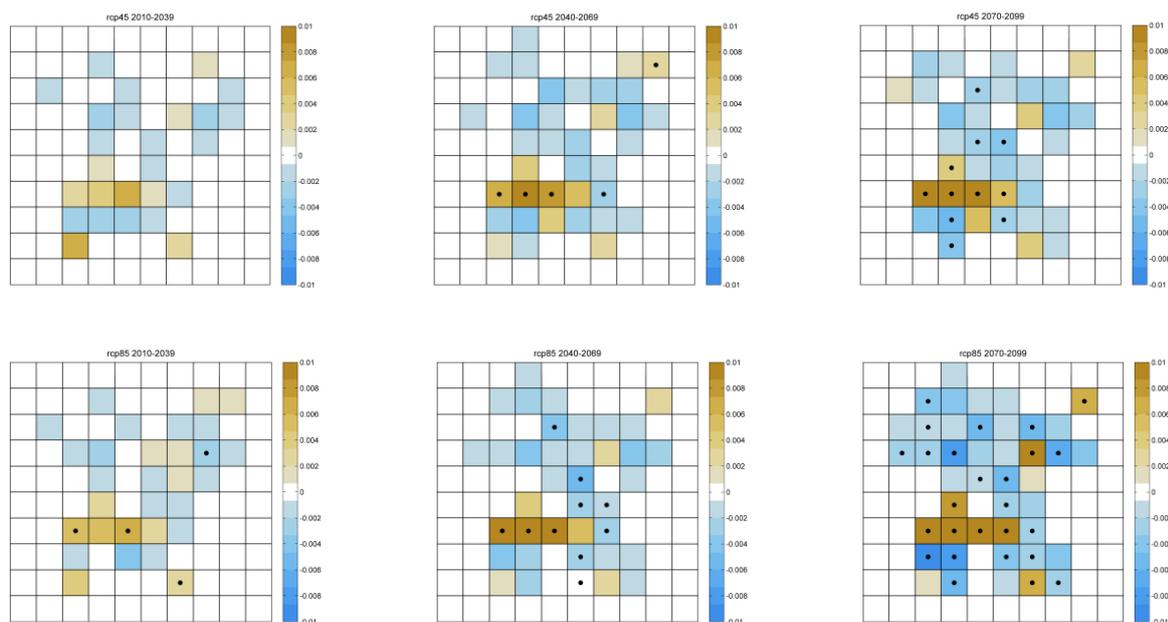


Figura 2.3. Cambios en las probabilidades de ocurrencia de los tipos de tiempo. Los paneles superiores representan los cambios para el escenario RCP4.5 y los inferiores para el escenario RCP8.5. La primera columna representa el período 2010-2039, la segunda el 2040-2069 y la tercera el 2070-2099. Los puntos de las celdas representan aquellos cambios con significancia estadística mayor del 95 % calculado con el test *t*-Student.

Proyecciones de las dinámicas

El modelo de *downscaling* estadístico asume como invariantes las relaciones estadísticas que ligan el predictor con el predictando. Por lo tanto, el único input del modelo, conocida la relación estadística, son los cambios en las probabilidades de ocurrencia de los tipos de tiempo, obtenidas en el apartado anterior. La ecuación (2.1) resume el cálculo de los

cambios en las dinámicas (por ejemplo oleaje) obtenidos como el sumatorio de los cambios en la altura de ola en cada tipo de tiempo:

$$\Delta F(H) = \sum_{i=1}^{100} \Delta p_i \cdot f_i(H) \quad (2.1)$$

Donde $f_i(H)$ es la distribución estadística del oleaje en cada tipo de tiempo, Δp_i son los cambios en las probabilidades de ocurrencia en cada tipo de tiempo y $\Delta F(H)$ es el cambio en la distribución de la altura de ola en el futuro.

2.1.2. Temperatura superficial del agua

Para el caso de la temperatura superficial del agua (SST de sus siglas en inglés, Sea Surface Temperature) se han seleccionado 22 modelos climáticos globales que se presentan en la tabla 2.2, donde figuran los nombres de los modelos, así como los grupos de investigación y países a los que pertenecen y la resolución atmosférica.

Model	Institution	Country	Atmospheric resolution (lat x lon, number of layers)
BCC-CSM1.1	Beijing Climate Center	China	1°L40
BCC-CSM1.1.m	Beijing Climate Center	China	1°L40
CCSM4	National Center for Atmospheric Research	USA	0,27-0,64°x1,125°L60
CESM1-BGC	Community Earth System Model Contributors	USA	0,27-0,64°x1,125°L60
CESM1-CAM5	Community Earth System Model Contributors	USA	0,27-0,64°x1,125°L60
CMCC-CM	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	Italy	2,0°L31
CMCC-CMS	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	Italy	2,0°L31
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques	France	1°L42
GFDL-CM3	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA	1°L50
GFDL-ESM2G	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA	1°L63
GFDL-ESM2M	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA	1°L50
HadGEM2-CC	MOHC	UK	1,25°x1,875°L40
HadGEM2-ES	MOHC	UK	1,25°x1,875°L40
IPSL-CM5A-LR	IPSL	France	2-0,5°x2°L31
IPSL-CM5A-MR	IPSL	France	2-0,5°x2°L31
IPSL-CM5B-LR	IPSL	France	2-0,5°x2°L31
MIROC5	AORI	Japan	0,5-1,4°x1,4°L50
MIROC-ESM	JAMSTEC	Japan	0,5-1,4°x1,4°L44
MIROC-ESM-CHEM	JAMSTEC	Japan	0,5-1,4°x1,4°L44
MPI-ESM-LR	MPI-M	Germany	1,5°L40
MPI-ESM-MR	MPI-M	Germany	0,4°L40
MRI-CGCM3	MRI	Japan	0,5°x1°L51

Tabla 2.2. Nombres de los GCMs del CMIP5, instituciones, países y resolución.

Como se ha detallado previamente, cada uno de estos 22 modelos genera unas condiciones futuras del clima para los dos escenarios considerados, por lo que se ha obtenido su *ensemble* para cada uno de ellos.

Los períodos de tiempo utilizados para la proyección de la SST son los mismos fijados para las dinámicas ya comentadas, es decir, tres períodos de tiempo de 30 años cada uno: 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099. De esta manera, para cada uno de los dos escenarios RCP considerados (4.5 y 8.5) se obtiene una proyección de la SST en la zona de estudio para el corto, medio y largo plazo, resultado de la media de los 22 modelos climáticos.

Los valores de estas proyecciones se han comparado con los valores históricos (período 1975-2005) disponibles en la zona (comparación clásica). De esta manera se han generado los valores de cambio para cada escenario en cada uno de los tres períodos que se muestran en los resultados.

2.2. Análisis de las dinámicas hidrometeorológicas: precipitación y temperatura del aire

Las proyecciones de precipitación y temperatura del aire se van a basar en las salidas de los modelos climáticos globales del CMIP5, proporcionadas en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 2013). Estas proyecciones están basadas en el *ensemble* de 42 modelos climáticos para los RCP4.5 y RCP8.5, donde el peso relativo de cada modelo es el mismo. Solo se han considerado aquellas ejecuciones forzadas con concentraciones de gases de efecto invernadero y no con emisiones, y tan solo se ha tenido en cuenta una ejecución por modelo, incluso aunque existieran múltiples ejecuciones con diferentes condiciones iniciales o variabilidad natural.

Las proyecciones se dan en períodos medios de 20 años para el corto plazo (2016-2035), medio plazo (2046-2065) y largo plazo (2081-2100), expresadas como anomalías con respecto al período de referencia 1986-2005. Hay que tener en cuenta que estas proyecciones están condicionadas por las hipótesis que se hacen de los forzamientos climáticos, afectados por las limitaciones de los modelos climáticos e inevitablemente sujetos a la variabilidad interna cuando consideramos un período específico de tiempo. Los patrones de cambio climático pueden diferir de una generación a otra de modelos climáticos debido a las mejoras continuas en los modelos. Ciertas insuficiencias son comunes a todos los modelos pero también se han visto, a lo largo de generaciones de modelos, muchos patrones de cambio comunes, lo cual da confianza en las proyecciones. Teniendo en cuenta todas estas advertencias, las proyecciones proporcionadas deben tomarse como un punto inicial de estudio de los cambios en las variables hidrometeorológicas precipitación y temperatura.

3. RESULTADOS

Inicialmente se van a describir los resultados obtenidos de las proyecciones de las dinámicas marinas. Primero los resultados de oleaje y marea meteorológica utilizando la metodología de *downscaling* estadístico. Posteriormente, se van a describir los resultados utilizados de las proyecciones regionalizadas del nivel medio del mar para la costa asturiana y las proyecciones de la temperatura superficial del agua en los diferentes períodos. Finalmente se muestran los mapas regionales de proyecciones de las dinámicas hidrometeorológicas precipitación y temperatura proporcionadas en el AR5 del IPCC y otros de carácter más local publicados por la AEMET.

3.1. Proyecciones de dinámicas marinas

3.1.1. Oleaje

Se han obtenido los cambios en dos parámetros de oleaje de régimen medio: la altura de ola significativa media (H_{smedia}) y la altura de ola correspondiente al 95 % ($H_{95\%}$), la cual corresponde a un cuantil bastante elevado de la distribución. Tal y como ya se ha explicado se han obtenido los cambios para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 y los períodos de tiempo 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099.

3.1.1.1. Cambios en la H_{smedia}

Aplicando el modelo de *downscaling* estadístico para el escenario RCP4.5 se han obtenido los cambios en la H_{smedia} mostrados en la figura 3.1. Se puede observar cómo se produce una reducción en la H_{smedia} de forma general a lo largo de toda la costa, más acusada en las zonas orientadas al noroeste. Sin embargo, la magnitud de los cambios es muy pequeña en todos los casos, con valores máximos de reducción del oleaje en 5 cm en las zonas de Avilés o Cudillero. En todos los períodos de tiempo el patrón es el mismo, y se puede observar que el cambio en la H_{smedia} en Gijón es ligeramente positivo en los períodos 2010-2039 y 2040-2069, y prácticamente nulo en el último tercio del siglo.

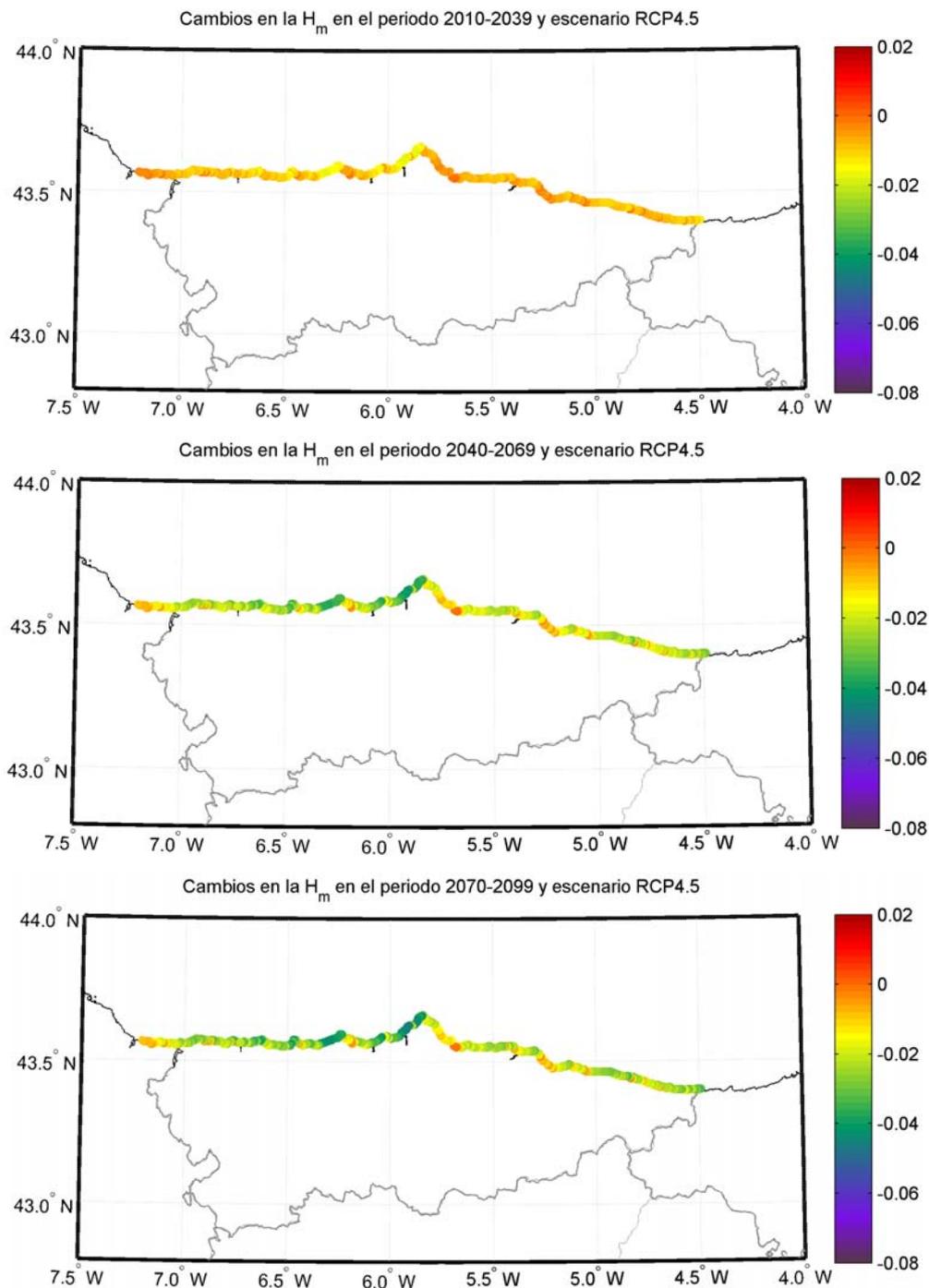


Figura 3.1. Cambios en la H_{smedia} (m) para el escenario RCP4.5 y los periodos 2010-2039 (panel superior), 2040-2069 (panel central) y 2070-2099 (panel inferior).

En el escenario RCP8.5 el patrón de cambios obtenido (véase la figura 3.2) es muy similar al del escenario RCP4.5 con valores negativos prácticamente en toda la costa salvo en algunos puntos orientados al noreste, entre ellos Gijón, donde el cambio es ligeramente positivo.

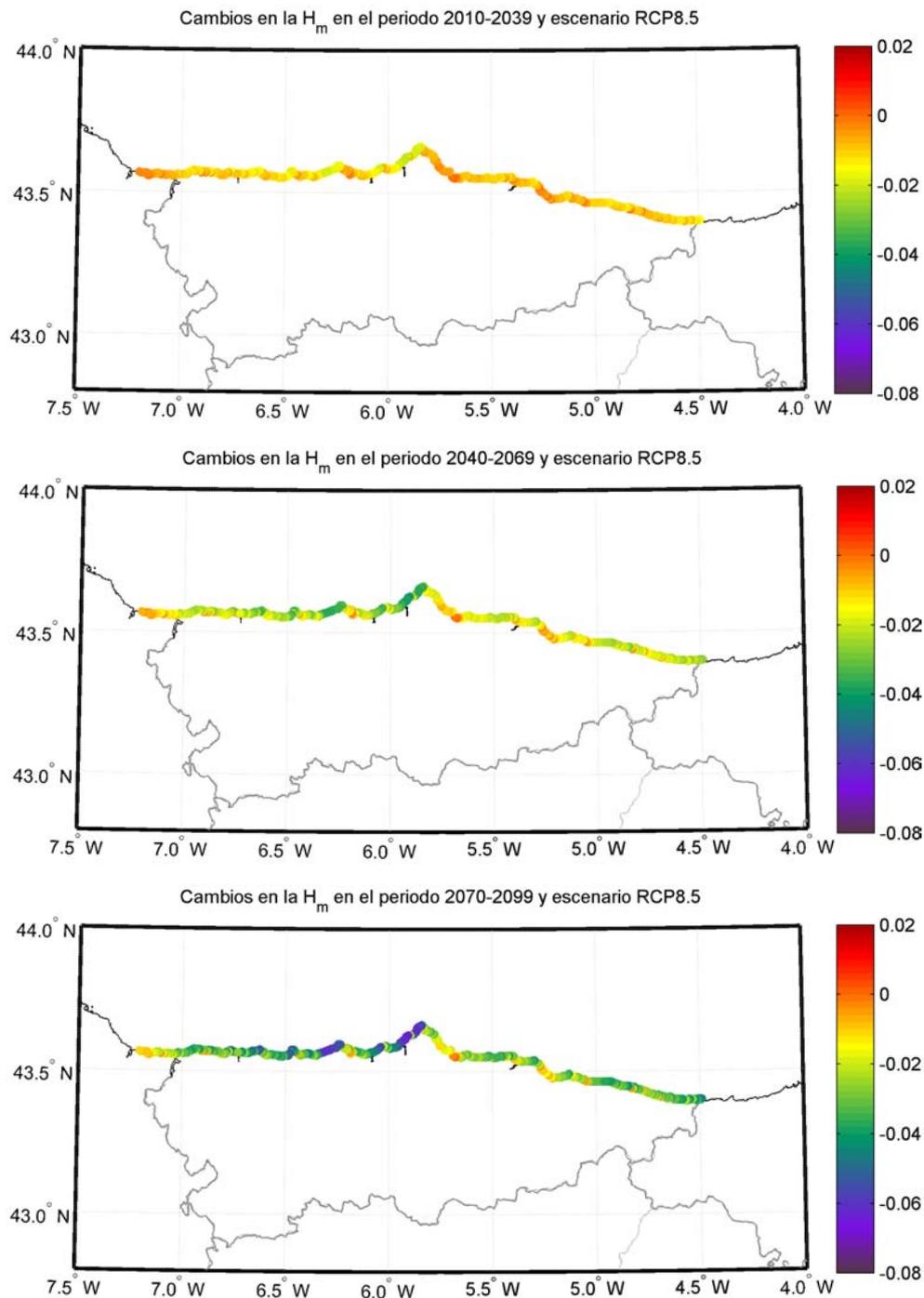


Figura 3.2. Cambios en la H_{smedia} (m) para el escenario RCP8.5 y los periodos 2010-2039 (panel superior), 2040-2069 (panel central) y 2070-2099 (panel inferior).

En el trabajo publicado por Wang et al. (2014) se estimaron los cambios en las alturas de ola a escala global proyectando las simulaciones multimodelo CMIP5 para el escenario RCP8.5. Los cambios obtenidos para la altura de ola media son una disminución del orden de 0.10 m para el periodo 2080-2099 respecto al periodo 1980-1999 en las proximidades de la costa española del Atlántico Norte.

3.1.1.2. Cambios en la $H_{95\%}$

Los cambios obtenidos para la $H_{95\%}$, que representa un estadístico de la parte alta de la distribución de alturas de ola, muestran un patrón similar que el de la H_{smedia} , pero con mayor magnitud en los cambios. En este caso, para el escenario RCP4.5 (véase la figura 3.3) la $H_{95\%}$ disminuye hasta 9 cm en algunos puntos de la costa occidental como Avilés o San Juan de la Arena. Nuevamente, en la zona de Gijón y otros puntos de la costa oriental los cambios son ligeramente positivos.

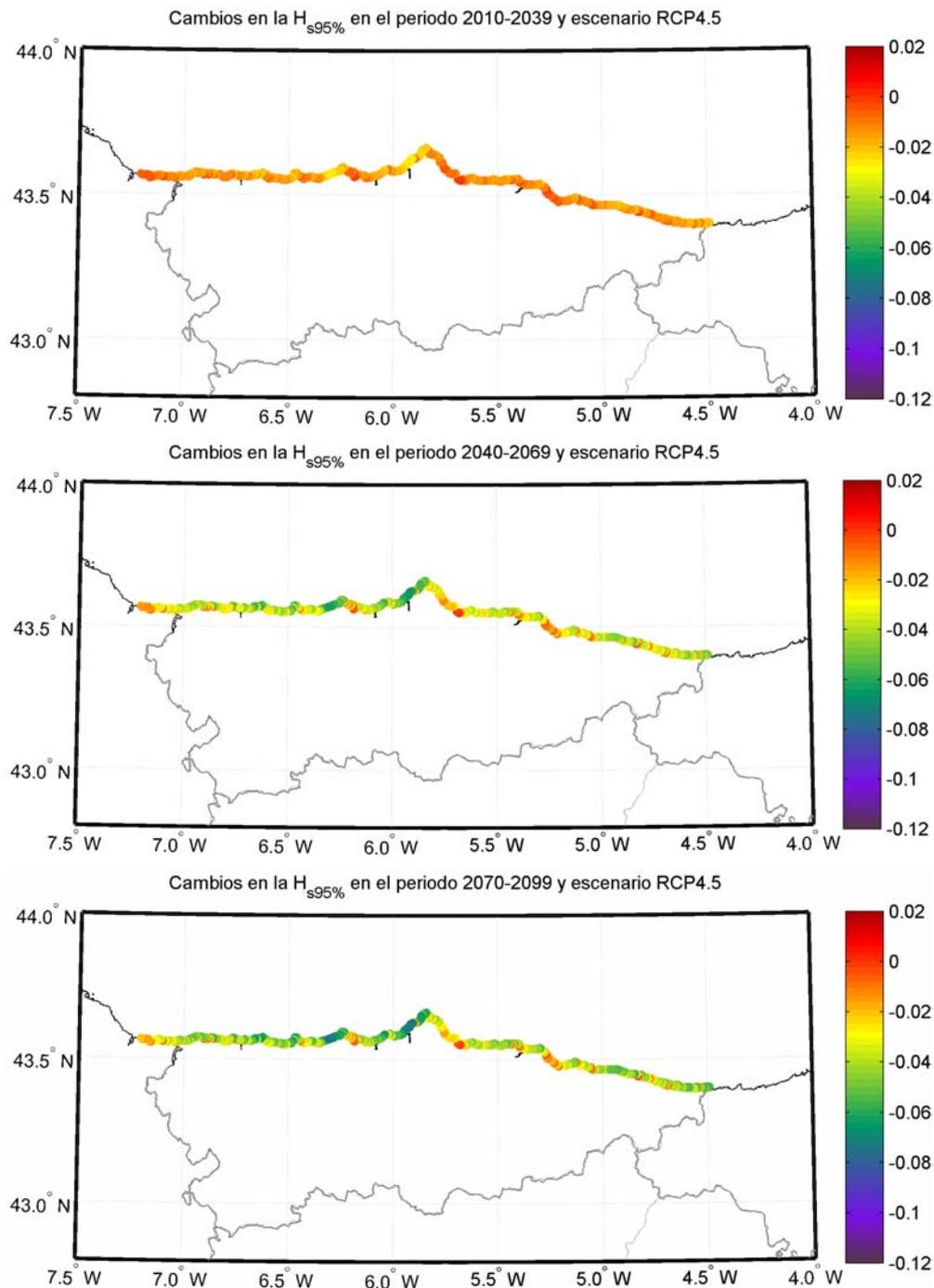


Figura 3.3. Cambios en la $H_{95\%}$ (m) para el escenario RCP4.5 y los períodos 2010-2039 (panel superior), 2040-2069 (panel central) y 2070-2099 (panel inferior).

En el escenario RCP8.5 (véase la figura 3.4) se puede observar que el patrón es prácticamente el mismo que en el RCP4.5, con valores de cambio ligeramente superiores a finales de siglo, alcanzando los 12 cm de reducción de altura de ola significativa.

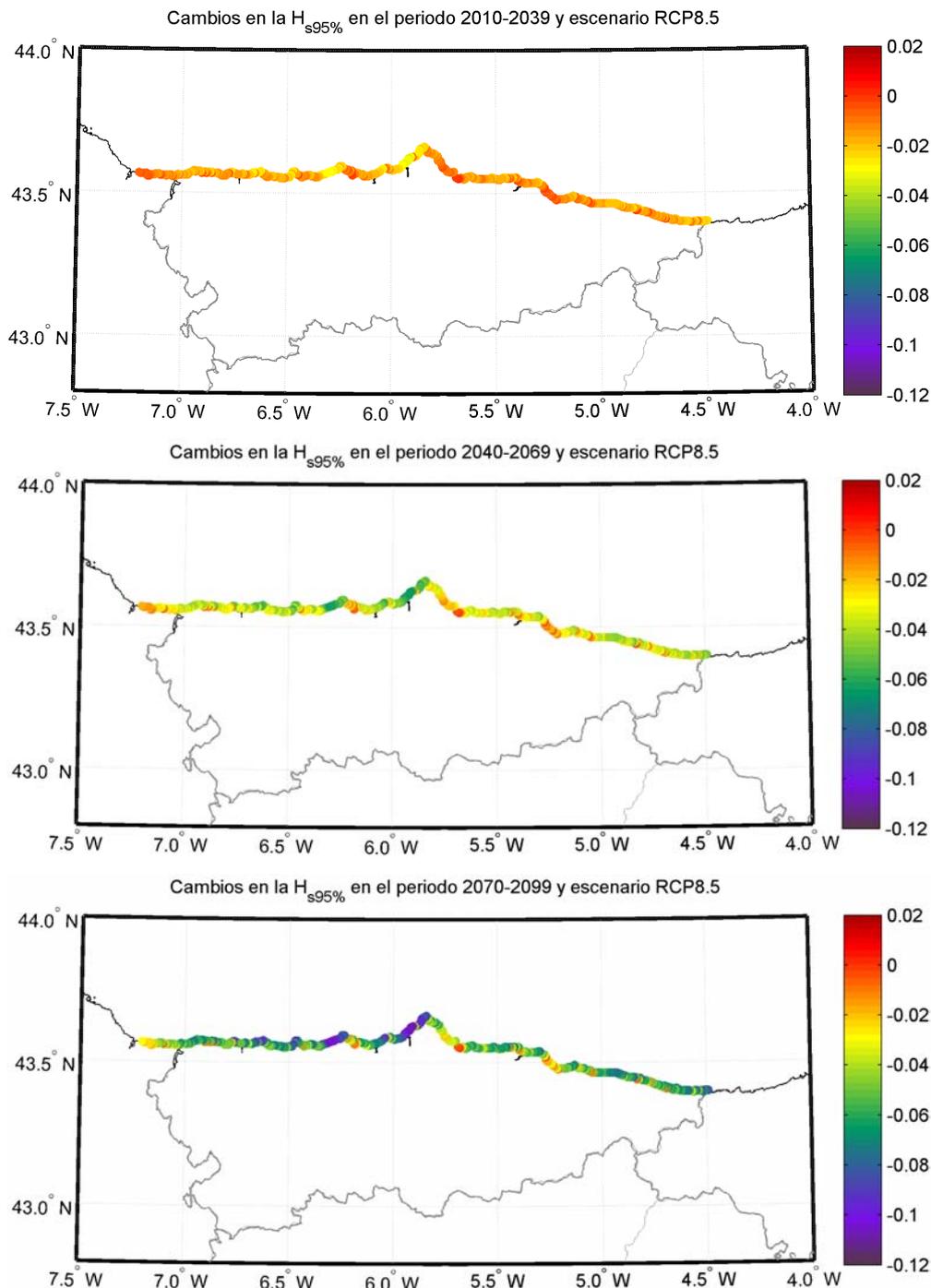


Figura 3.4. Cambios en la $H_{s95\%}$ (m) para el escenario RCP8.5 y los períodos 2010-2039 (panel superior), 2040-2069 (panel central) y 2070-2099 (panel inferior).

3.1.2. Marea meteorológica

Para esta dinámica se van a mostrar los cambios proyectados en la marea meteorológica del percentil del 95 % ($MM_{95\%}$), es decir, de un valor representativo de la parte alta de la distribución. La figura 3.5 muestra los cambios para el escenario RCP4.5. Se puede ver un patrón general de reducción de la $MM_{95\%}$, algo más acentuado en la costa occidental asturiana, y que va aumentando a medida que transcurre el siglo XXI. Sin embargo, la magnitud del cambio es muy pequeña, siendo a finales de siglo de apenas 0.7 cm.

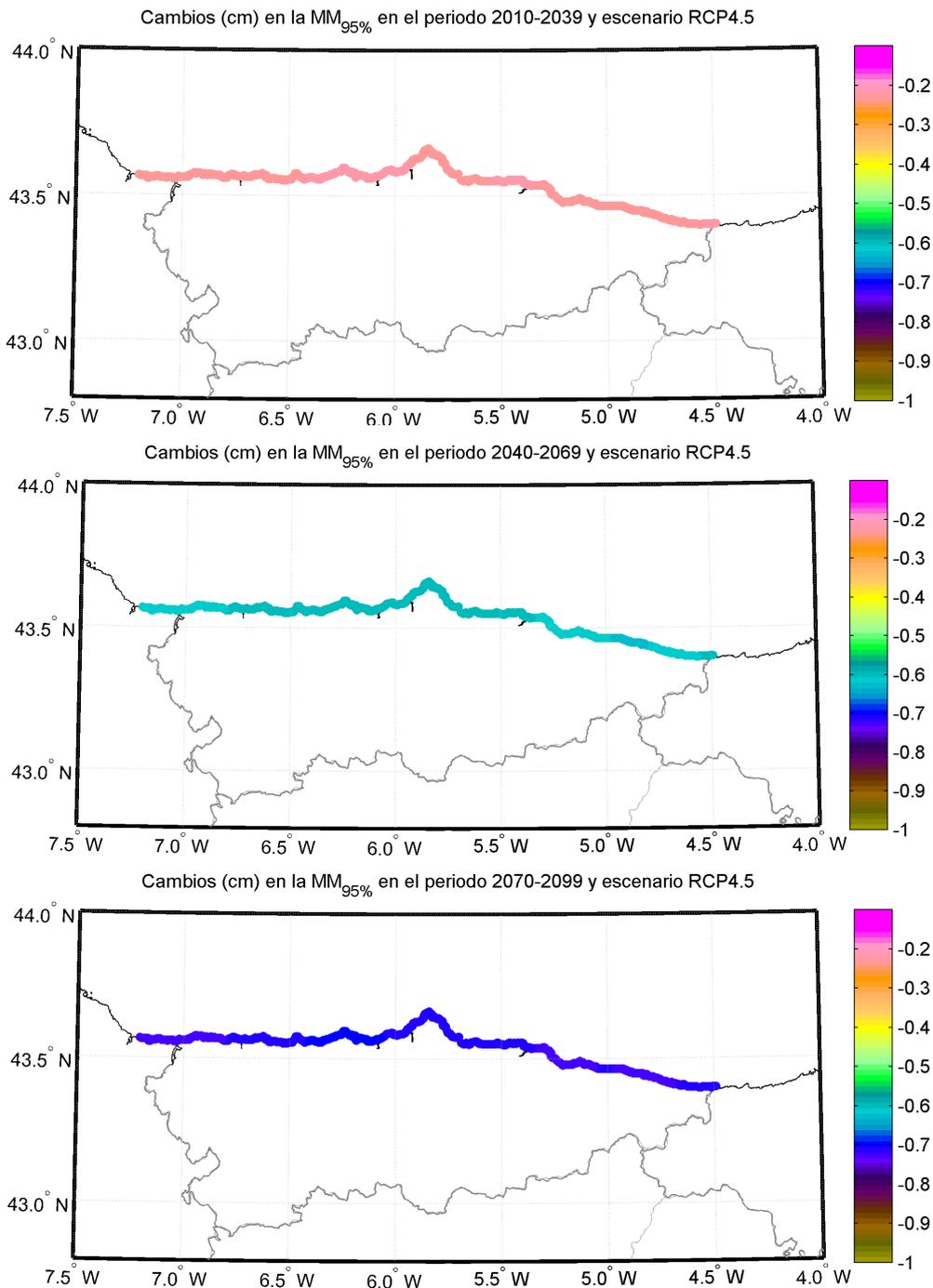


Figura 3.5. Cambios en la $MM_{95\%}$ (cm) para el escenario RCP4.5 y los periodos 2010-2039 (panel superior), 2040-2069 (panel central) y 2070-2099 (panel inferior).

En el caso del RCP8.5 (véase la figura 3.6) se puede observar que el patrón espacial y la tendencia a lo largo del siglo XXI es similar que en el caso del RCP4.5, con una ligera intensificación en los valores, pero en ningún caso superando los 0.8 cm de disminución a finales de siglo.

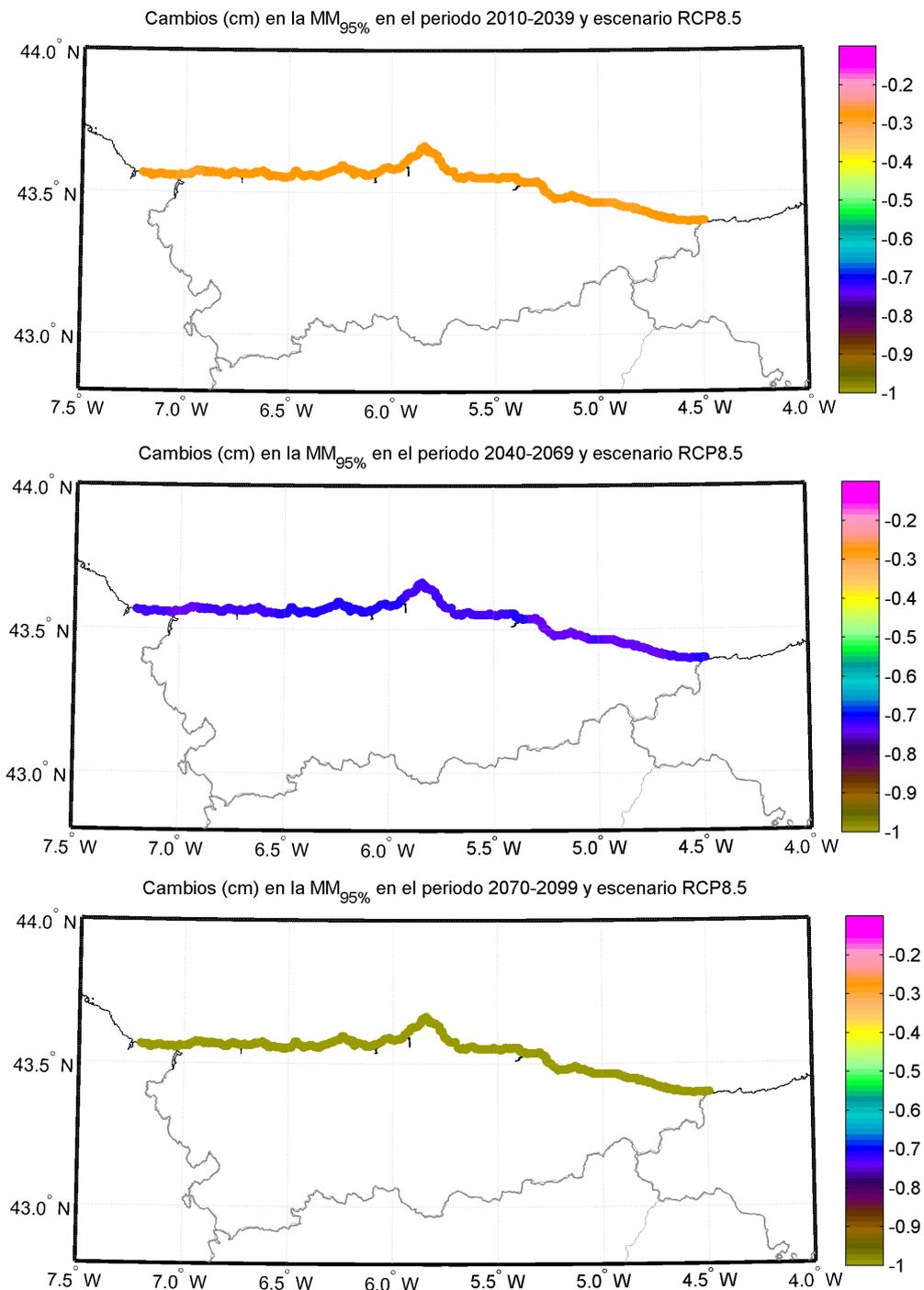


Figura 3.6. Cambios en la $MM_{95\%}$ (m) para el escenario RCP8.5 y los períodos 2010-2039 (panel superior), 2040-2069 (panel central) y 2070-2099 (panel inferior).

3.1.3. Nivel medio del mar regional

Son dos los factores principales que causan la subida del nivel del mar global: la expansión térmica del agua del mar y el deshielo. A medida que el agua se va calentando se produce un aumento de su volumen que da lugar a un aumento en el nivel y, por otro lado, el aumento de la temperatura contribuye al deshielo de glaciares y otras reservas de agua continentales y de las principales placas de hielo de la Antártida y Groenlandia (Meehl et al. 2007). Hoy en día se sabe que la expansión térmica de los océanos es responsable de alrededor de un tercio de la subida del nivel del mar global producida en el siglo XX hasta 1990. Desde entonces, el deshielo procedente de glaciares, y capas de hielo continentales y polares ha sido mucho más importante.

Los océanos se calientan mucho más lentamente que la atmósfera, por lo que la expansión térmica se produce décadas más tarde que el aumento de la temperatura del aire. La expansión térmica del agua puede predecirse con moderada confianza, al igual que el deshielo de glaciares continentales y otras reservas de agua, gracias a los datos medidos y el conocimiento de las reservas de hielo continental. Sin embargo, la contribución al nivel del mar por el deshielo de los casquetes polares es mucho más difícil de estimar, debido al tamaño de las placas de hielo, la variación del clima a lo largo de su extensión y la escasez de datos disponibles. En la escala de tiempo de siglos la contribución del deshielo de las placas de Groenlandia o la Antártida es incierta, pudiendo experimentarse aumentos por encima de 1 m si su contribución es significativa.

Las proyecciones de nivel medio del mar hechas para el siglo XXI están obtenidas fundamentalmente mediante dos tipos de modelos: los modelos basados en procesos físicos (modelos acoplados atmósfera-océano que contemplan todos los procesos descritos) y los modelos semi-empíricos, que se basan en datos paleoclimáticos y formulaciones semi-empíricas. Mientras que los modelos basados en procesos contemplan aumentos de nivel del mar en torno a 1 m a final del siglo XXI para los escenarios más pesimistas, los modelos semi-empíricos dan valores mucho más elevados, variando entre los 1.5 y 2.5 m dependiendo del modelo. Ambas familias de modelos son consideradas en los análisis de riesgo, pues los modelos semi-empíricos representan un escenario muy pesimista que no se puede desechar completamente.

El Quinto Informe de Evaluación (AR5) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC 2014) publicó en Febrero de 2014 los últimos valores de aumento de nivel medio del mar global para los escenarios RCPs. Para los escenarios RCP4.5 (escenario moderado) y RCP8.5 (escenario pesimista) los valores son de 0.52 m y 0.73 m respectivamente para finales de siglo. Sin embargo, el nivel del mar no está subiendo igual en todas las partes del mundo, y en los estudios regionales y locales de riesgo, como es este caso, los valores necesarios de aumento de nivel del mar son los del nivel del mar regional. Hasta el momento, los trabajos hechos de regionalización del aumento del nivel medio del mar son pocos. Las proyecciones de nivel del mar global para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 han sido regionalizadas para las cuencas de todo el mundo por Slangen et al. (2014), considerando los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. La regionalización se ha hecho combinando los procesos de cambios en la circulación oceánica y aumento de absorción de calor y presión atmosférica incluidos en los modelos climáticos de la fase 5 del proyecto WRCMP Coupled Model Intercomparison Project, CMIP5 (Taylor et al. 2012) con los resultados de modelos y observaciones regionales de

contribución de hielo, disminución de aguas subterráneas y reajuste por isostasia glaciar, incluyendo efectos gravitacionales debidos a la redistribución de masa. La figura 3.7 muestra el aumento del nivel medio del mar para los dos escenarios considerados, en el período 2081-2100, en las costas asturianas, a partir de los datos de Slangen et al. (2014). En ambos casos se observa poca variabilidad espacial, con valores en torno a 0.47 m para el escenario RCP4.5 y a 0.62 para el escenario RCP8.5.

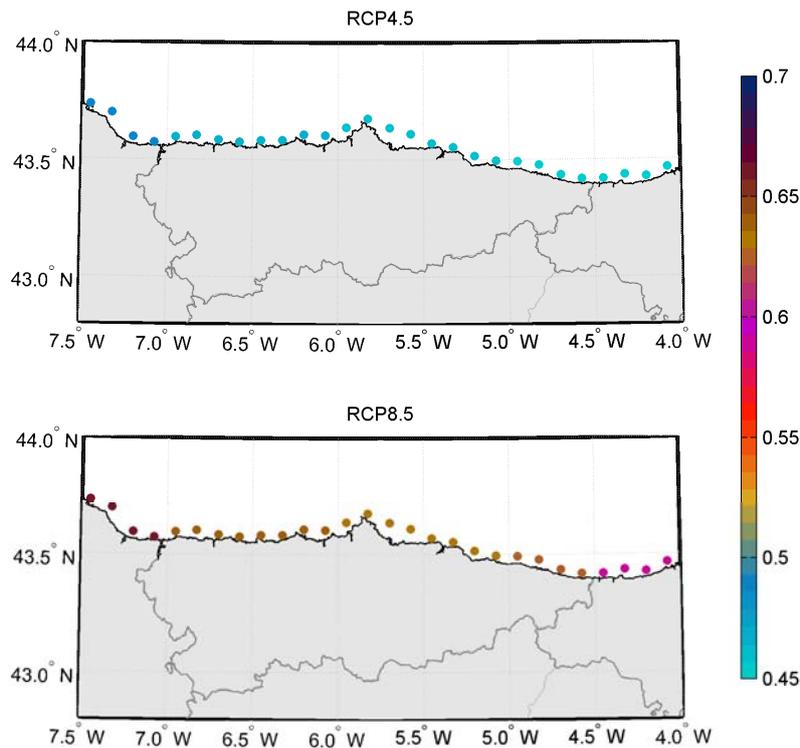


Figura 3.7. Proyecciones del aumento del nivel medio del mar regional (m) en la costa asturiana para el RCP4.5 (panel superior) y el RCP8.5 (panel inferior) obtenidas de Slangen et al. (2014).

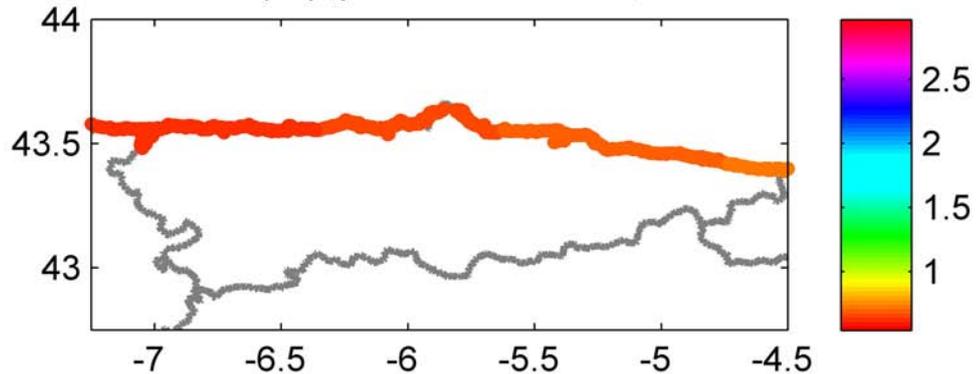
3.1.4. Temperatura superficial del agua

La temperatura es un factor relevante en los procesos bioquímicos de los organismos que determina respuestas fisiológicas diferentes, entre las que se incluyen los ratios de crecimiento o los esfuerzos reproductivos (García et al., 2013; Doney et al., 2012). De hecho, se considera que es uno de los principales factores que controlan el crecimiento de los productores primarios como las fanerógamas marinas (Lee et al., 2007) o las macroalgas (Lüning, 1990) y de algunos consumidores (Salman et al., 2001; Panigada et al., 2008).

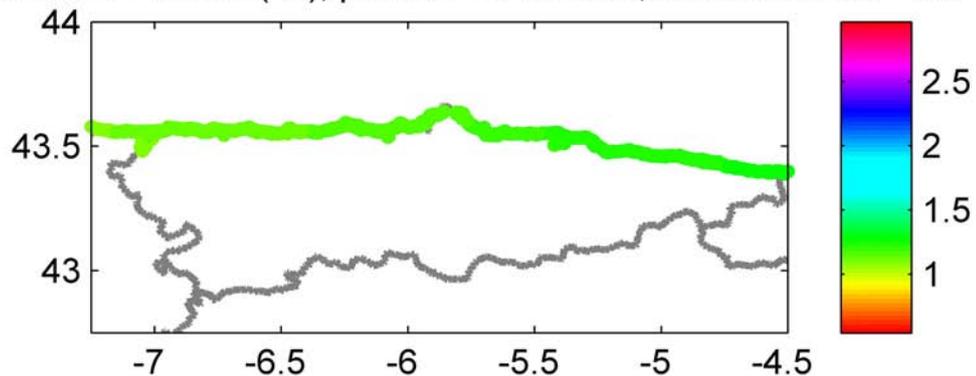
El patrón observado en la costa asturiana se enmarca en el ya definido para el norte de España en estudios previos (Duarte et al., 2013; Ramos et al., 2014), es decir, una mayor aumento de las temperaturas en la zona este que disminuye hacia Galicia.

En concreto, para los valores de temperatura media representados en la figura 3.8 y figura 3.9, se observa con claridad un gradiente en el incremento de temperaturas de Oeste a Este. Este incremento de temperatura es mayor a medida que los periodos son más lejanos, alcanzándose los máximos en el largo plazo (2070-2099). Así, para el escenario más pesimista (RCP 8.5) los aumentos máximos en este periodo son superiores a un grado con respecto al escenario RCP 4.5 (1.69°C frente a 2.96°C).

Cambios SST media (°C), periodo 2010-2039, escenario RCP 4.5



Cambios SST media (°C), periodo 2040-2069, escenario RCP 4.5



Cambios SST media (°C), periodo 2070-2099, escenario RCP 4.5

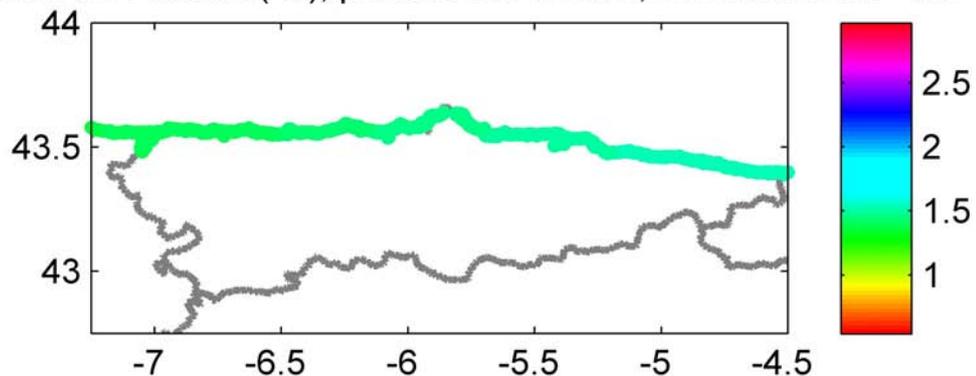
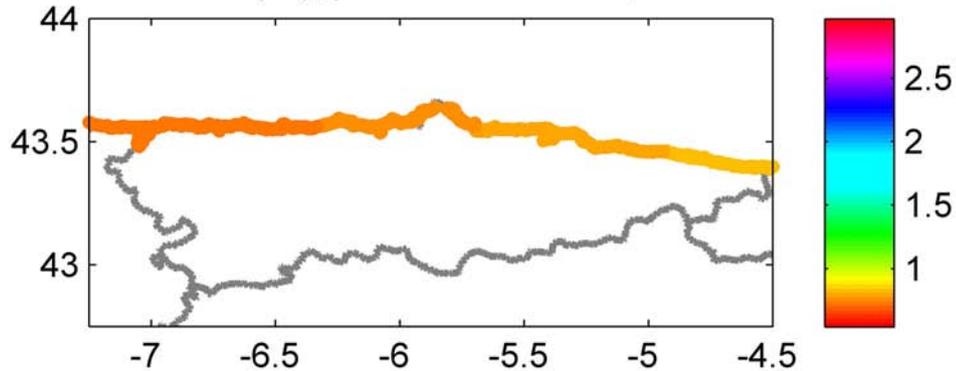
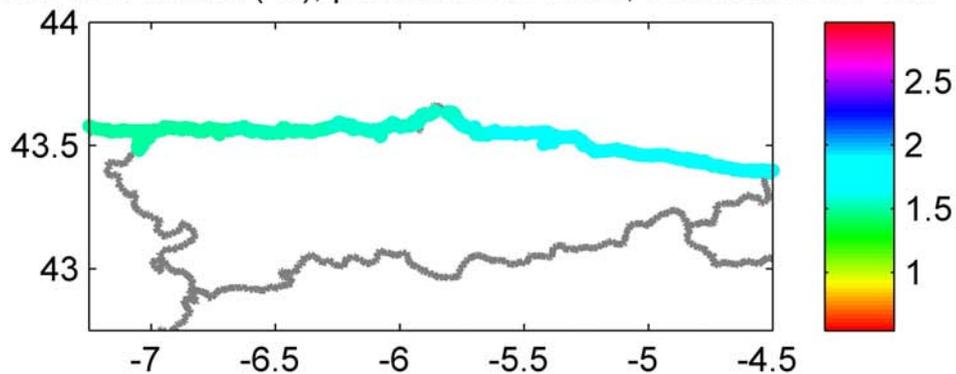


Figura 3.8. Cambios en la SST_{media} (°C) para el escenario RCP 4.5 y los periodos 2010-2039 (panel superior), 2040-2069 (panel central) y 2070-2099 (panel inferior).

Cambios SST media (°C), periodo 2010-2039, escenario RCP 8.5



Cambios SST media (°C), periodo 2040-2069, escenario RCP 8.5



Cambios SST media (°C), periodo 2070-2099, escenario RCP 8.5

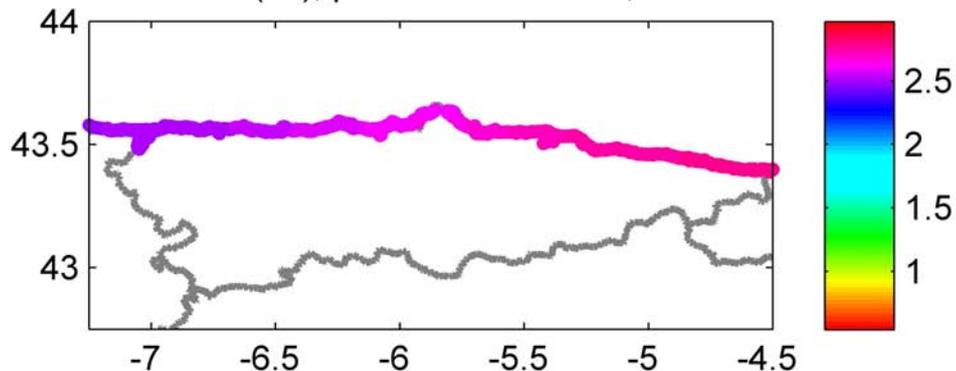
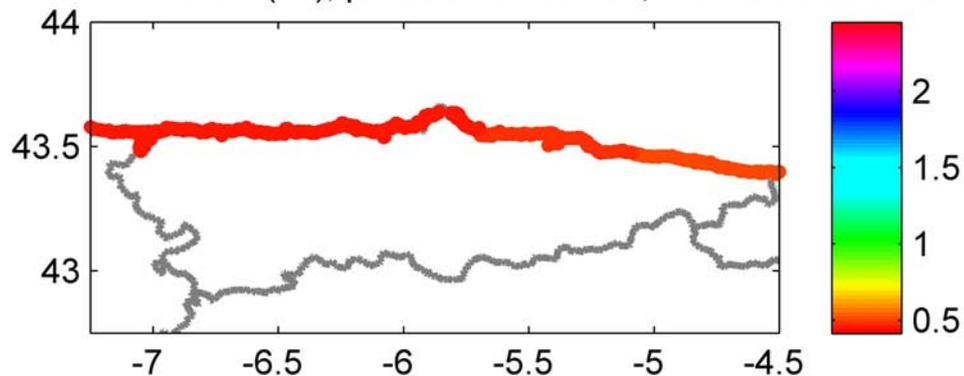


Figura 3.9. Cambios en la SST_{media} (°C) para el escenario RCP 8.5 y los periodos 2010-2039 (panel superior), 2040-2069 (panel central) y 2070-2099 (panel inferior).

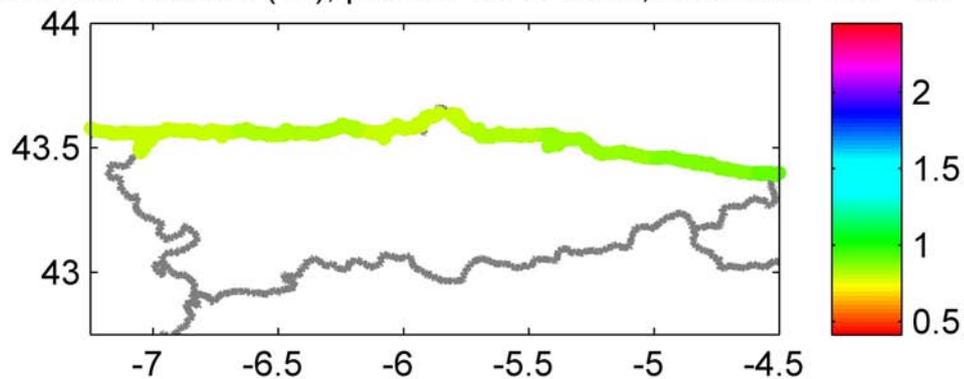
En la costa oeste asturiana, para los dos escenarios analizados y los diferentes periodos de tiempo (véanse las figuras 3.10 y 3.11), los valores son superiores a 0.4°C, llegando los máximos a 1.4°C para el RCP 4.5 en el largo plazo (2070-2099) y a 2.4°C para el RCP 8.5 en este mismo periodo.

En cuanto a la distribución de las temperaturas mínimas en la costa de Asturias, el patrón predominante es el comentado anteriormente, mayores aumentos en la costa oeste que disminuyen progresivamente hacia el Este, tal y como se ha descrito en trabajos previos (Ramos et al., 2015).

Cambios SST mínima (°C), periodo 2010-2039, escenario RCP 4.5



Cambios SST mínima (°C), periodo 2040-2069, escenario RCP 4.5



Cambios SST mínima (°C), periodo 2070-2099, escenario RCP 4.5

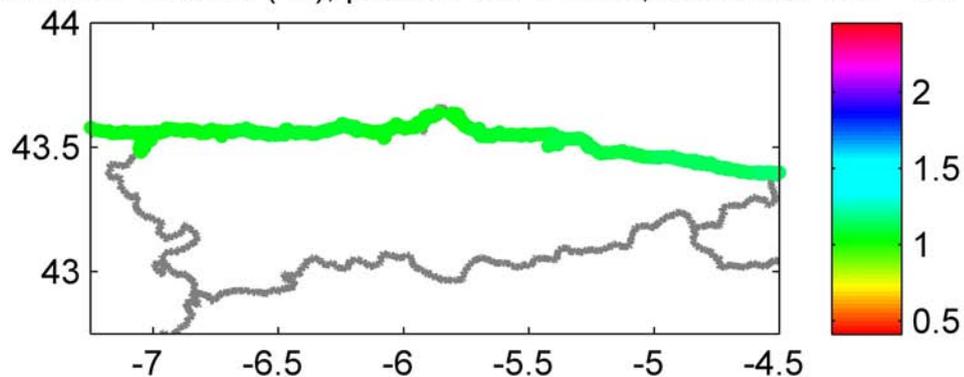
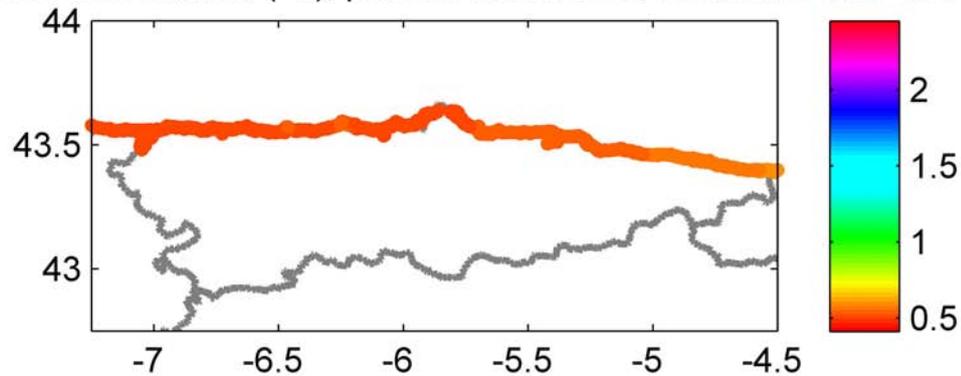
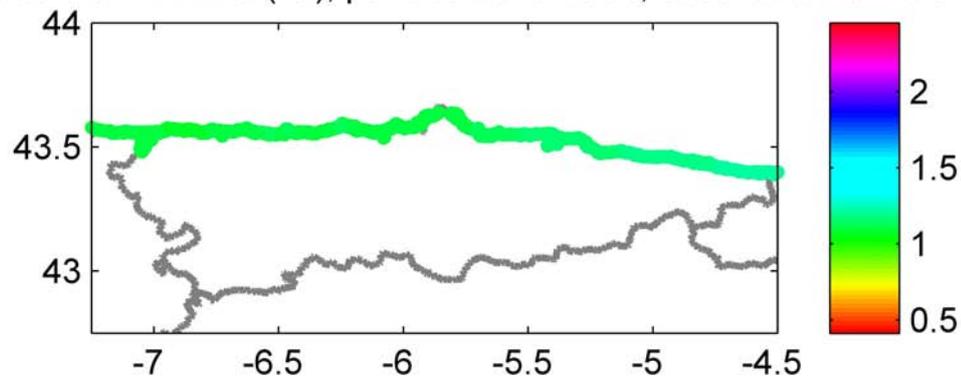


Figura 3.10. Cambios en la SST_{mínima} (°C) para el escenario RCP 4.5 y los periodos 2010-2039 (panel superior), 2040-2069 (panel central) y 2070-2099 (panel inferior).

Cambios SST mínima (°C), periodo 2010-2039, escenario RCP 8.5



Cambios SST mínima (°C), periodo 2040-2069, escenario RCP 8.5



Cambios SST mínima (°C), periodo 2070-2099, escenario RCP 8.5

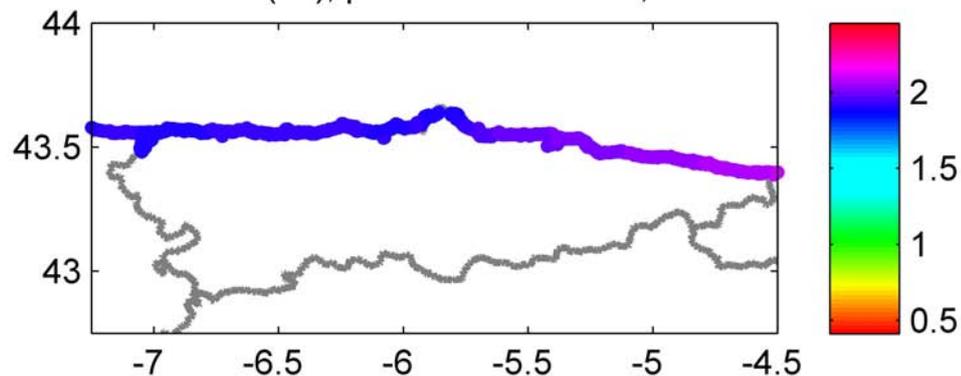
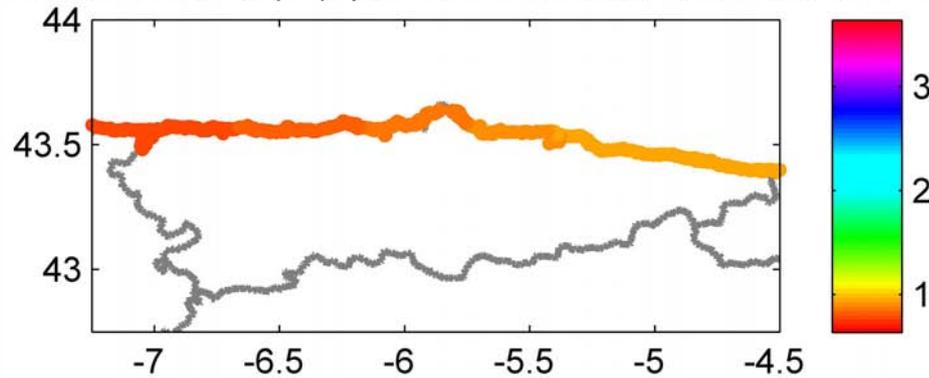


Figura 3.11. Cambios en la SST_{mínima} (°C) para el escenario RCP 8.5 y los períodos 2010-2039 (panel superior), 2040-2069 (panel central) y 2070-2099 (panel inferior).

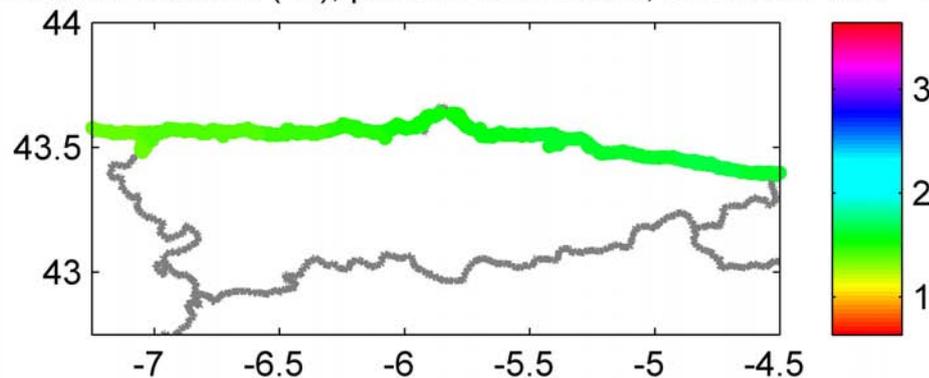
Las temperaturas máximas (véanse las figuras 3.12 y 3.13) se distribuyen como en los casos anteriores, registrándose valores decrecientes hacia el Oeste. También se mantiene la tendencia de aumento de la magnitud del cambio a medida que se aleja el horizonte temporal. Destaca que para el período 2070-2099 se alcanzan para el RCP 8.5 incrementos de hasta 3.6°C. Hay que resaltar que los valores más altos se extienden geográficamente más al oeste de Cabo Peñas, es decir, que los cambios más relevantes afectan a una parte importante de la franja costera y con ello al biotopo que alberga.

En relación con estos resultados cabe destacar que los cambios estimados, tanto para las temperaturas máximas como mínimas, son de suficiente magnitud como afectar a la distribución geográfica de determinadas especies, siendo especialmente crítico para aquéllas que se encuentren en su límite de distribución (Duarte et al., 2013).

Cambios SST máxima (°C), periodo 2010-2039, escenario RCP 4.5



Cambios SST máxima (°C), periodo 2040-2069, escenario RCP 4.5



Cambios SST máxima (°C), periodo 2070-2099, escenario RCP 4.5

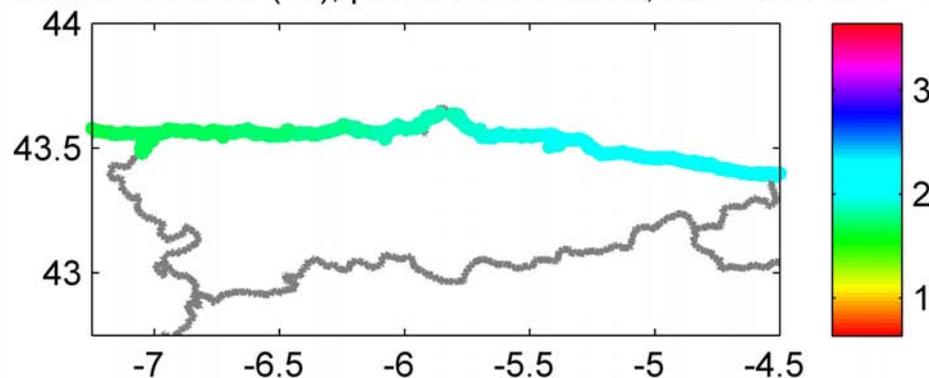
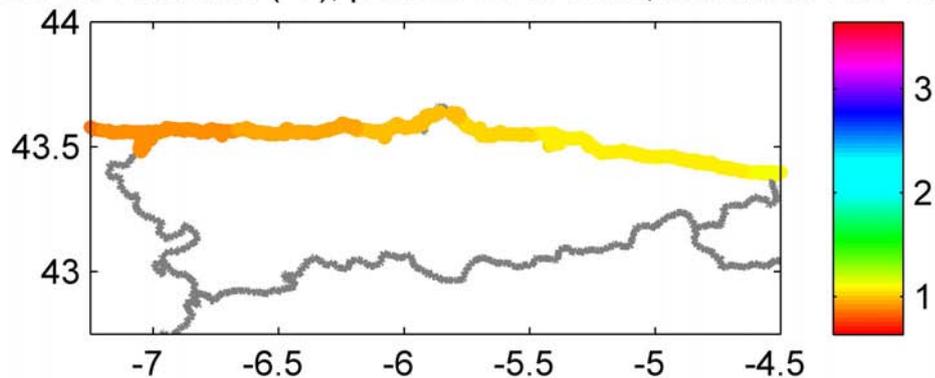
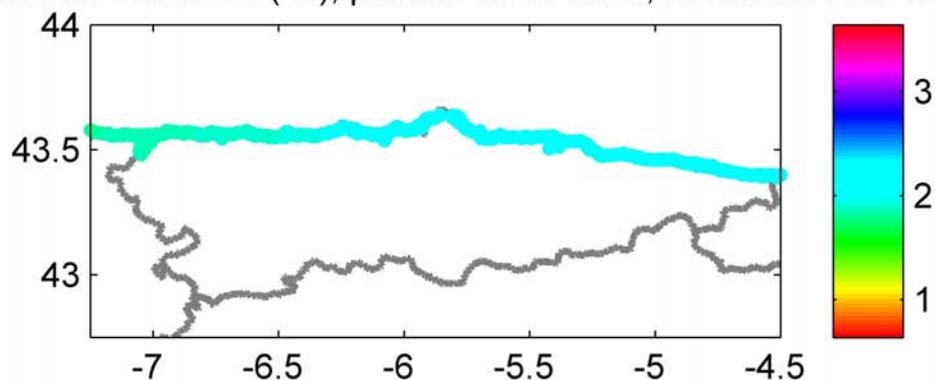


Figura 3.12. Cambios en la SST_{máxima} (°C) para el escenario RCP 4.5 y los periodos 2010-2039 (panel superior), 2040-2069 (panel central) y 2070-2099 (panel inferior).

Cambios SST máxima (°C), periodo 2010-2039, escenario RCP 8.5



Cambios SST máxima (°C), periodo 2040-2069, escenario RCP 8.5



Cambios SST máxima (°C), periodo 2070-2099, escenario RCP 8.5

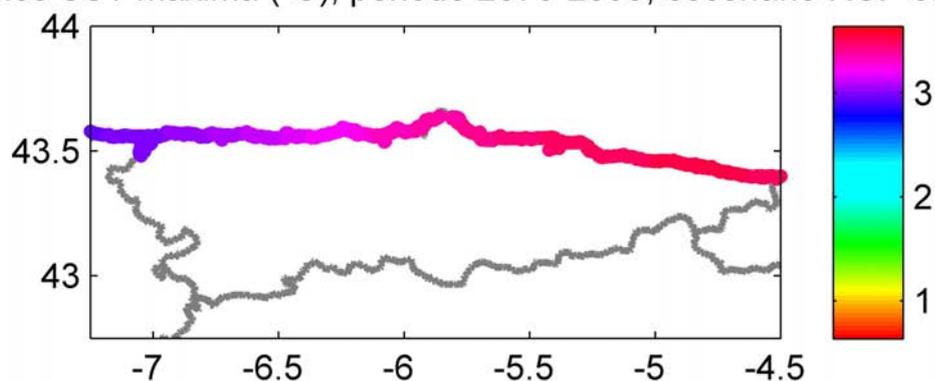


Figura 3.13. Cambios en la SST_{máxima} (°C) para el escenario RCP 8.5 y los periodos 2010-2039 (panel superior), 2040-2069 (panel central) y 2070-2099 (panel inferior).

3.2. Proyecciones de dinámicas hidrometeorológicas

3.2.1. Precipitación

Las figuras 3.14 y 3.15 representan la serie temporal de los cambios en la precipitación relativa (porcentaje de cambio sobre la media) en los puntos de tierra de la rejilla que representa la región del Sur de Europa/Mediterráneo (30°N-45°N, 10°O-40°E), para los periodos Octubre-Marzo (época de lluvias) y Abril-Septiembre (época estival). Se puede ver como en ambos casos los cambios muestran una reducción en las precipitaciones, aunque en ambos casos de pequeña magnitud. Hasta mediados de siglo las proyecciones de los 4 RCPs son muy similares, difiriendo más a finales de siglo, donde, en el período Octubre-Marzo para el RCP8.5 la proyección es de un 12 % menos de precipitación, mientras que en el período Abril-Septiembre estos cambios llegan hasta el 20 %.

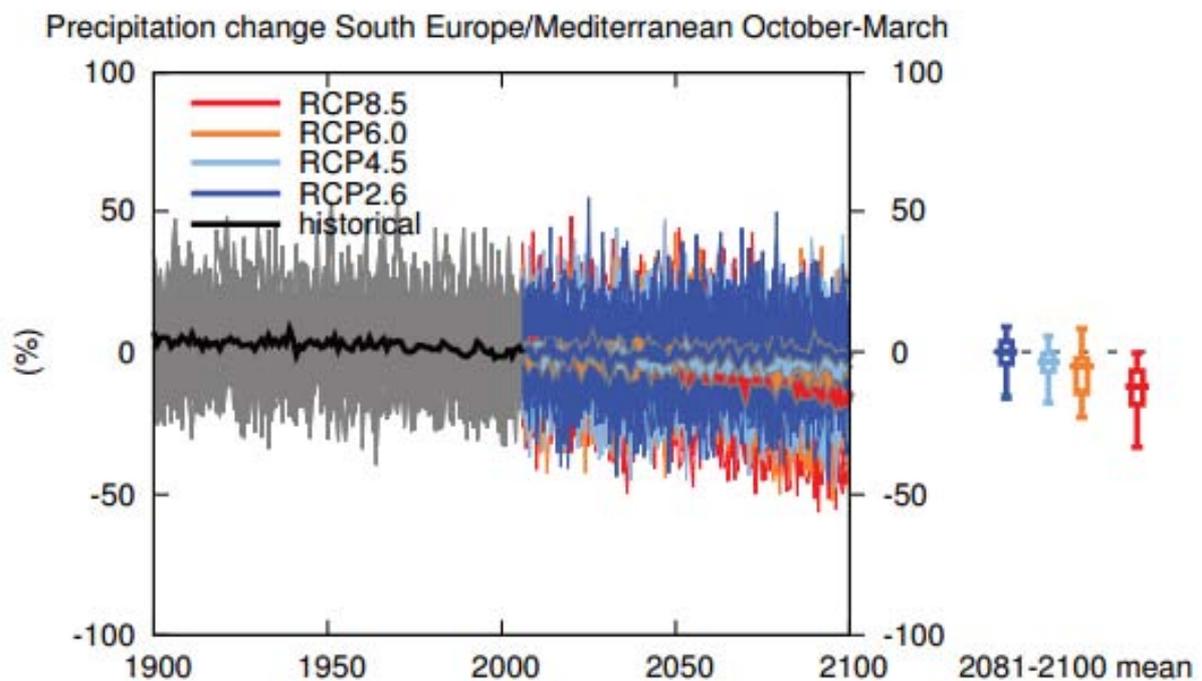


Figura 3.14. Serie temporal de cambios en la precipitación relativa (% respecto a la media) del sur de Europa/Mediterráneo en el período Octubre-Marzo. Fuente: IPCC, 2013.

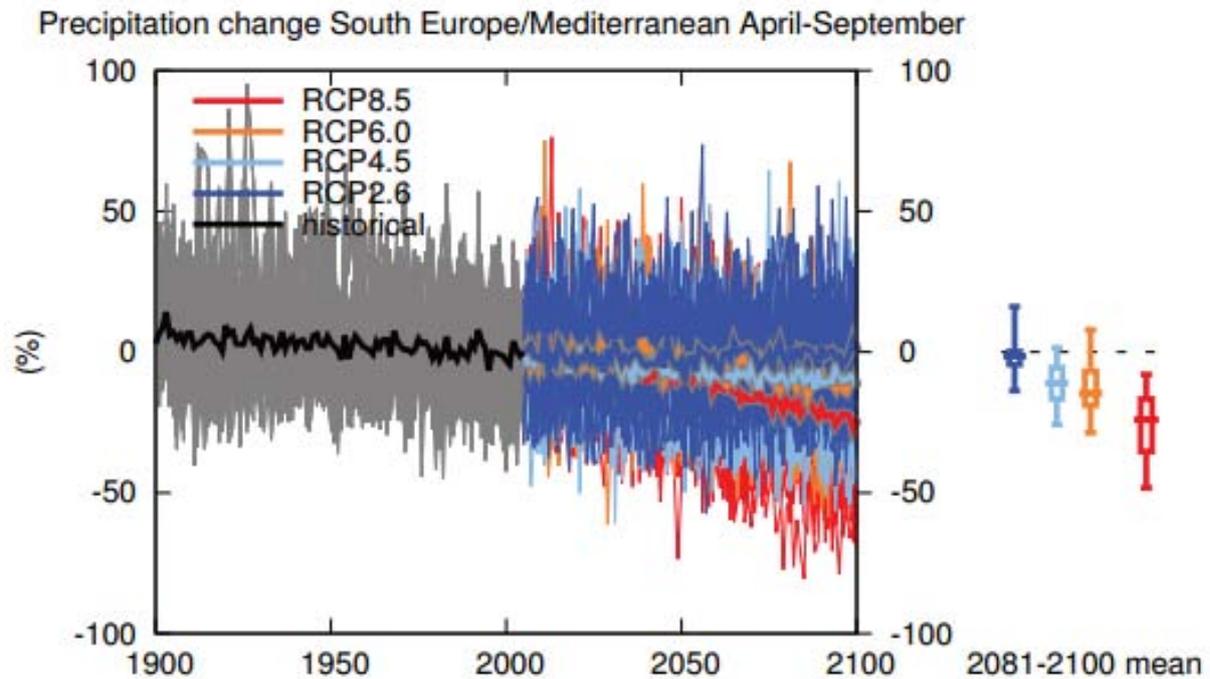


Figura 3.15. Serie temporal de cambios en la precipitación relativa (% respecto a la media) del sur de Europa/Mediterráneo en el período Abril-Septiembre. Fuente: IPCC, 2013

En los mapas espaciales (véanse las figuras 3.16 y 3.17) se puede ver como en la región de Asturias se espera una reducción generalizada del patrón de precipitación. Esta reducción es más acusada en el período estival (Abril-Septiembre) y en todos los percentiles estudiados, con hasta reducciones del 20 % en el período 2081-2100. En la época de lluvias (Octubre-Marzo) la reducción proyectada es menor, en torno al 10% en los percentiles del 25 y 50 % de la distribución de lluvias, mientras que incluso se esperan aumentos de en torno al 10% en la parte alta de la distribución en los tres períodos de tiempo estudiados.

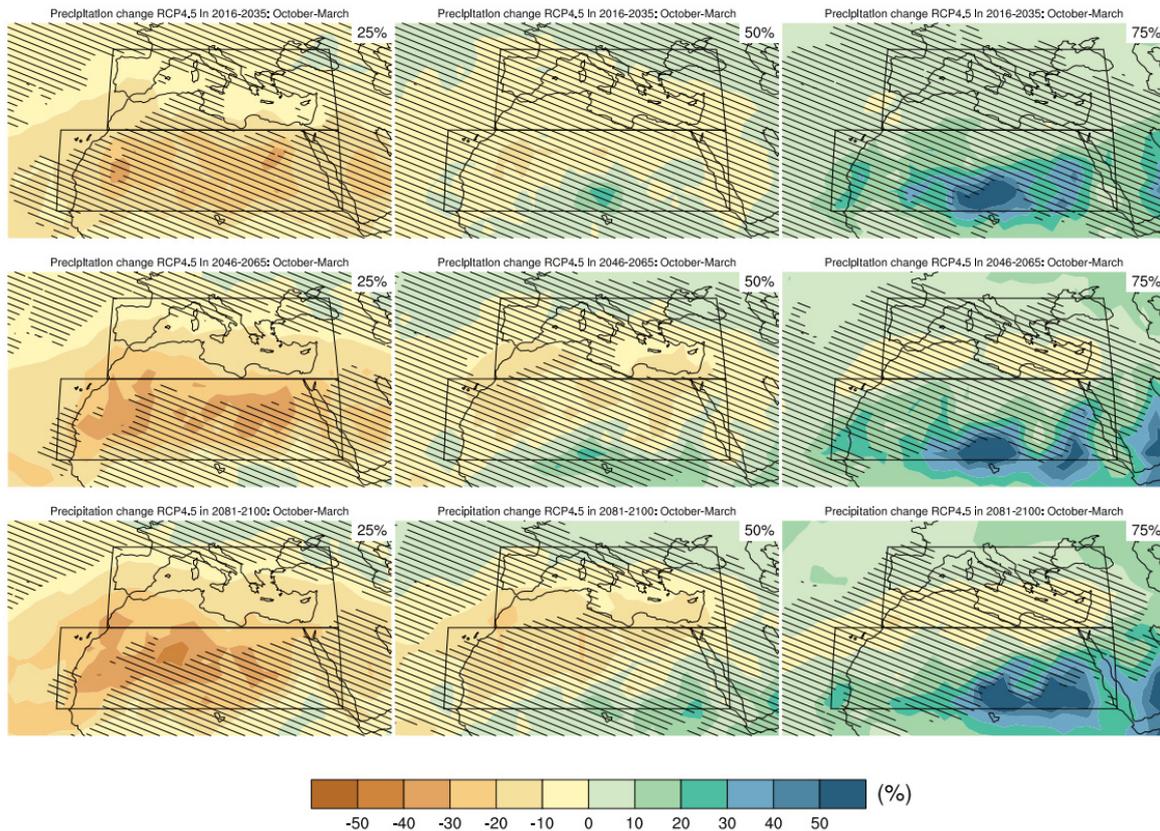


Figura 3.16. Mapas de cambios en la precipitación en Octubre-Marzo en 2016-2035, 2046-2065 y 2081-2100 con respecto al período 1986-2005 en el escenario RCP4.5. En cada punto de la rejilla espacial se muestran el percentil del 25, 50 y 75 % de la distribución del *ensemble* de modelos CMIP5. Las zonas rayadas representan áreas donde la diferencia en los percentiles en la media de los 20 años es menor que la desviación estándar de la variabilidad natural estimada a día de hoy. Fuente: IPCC, 2013.

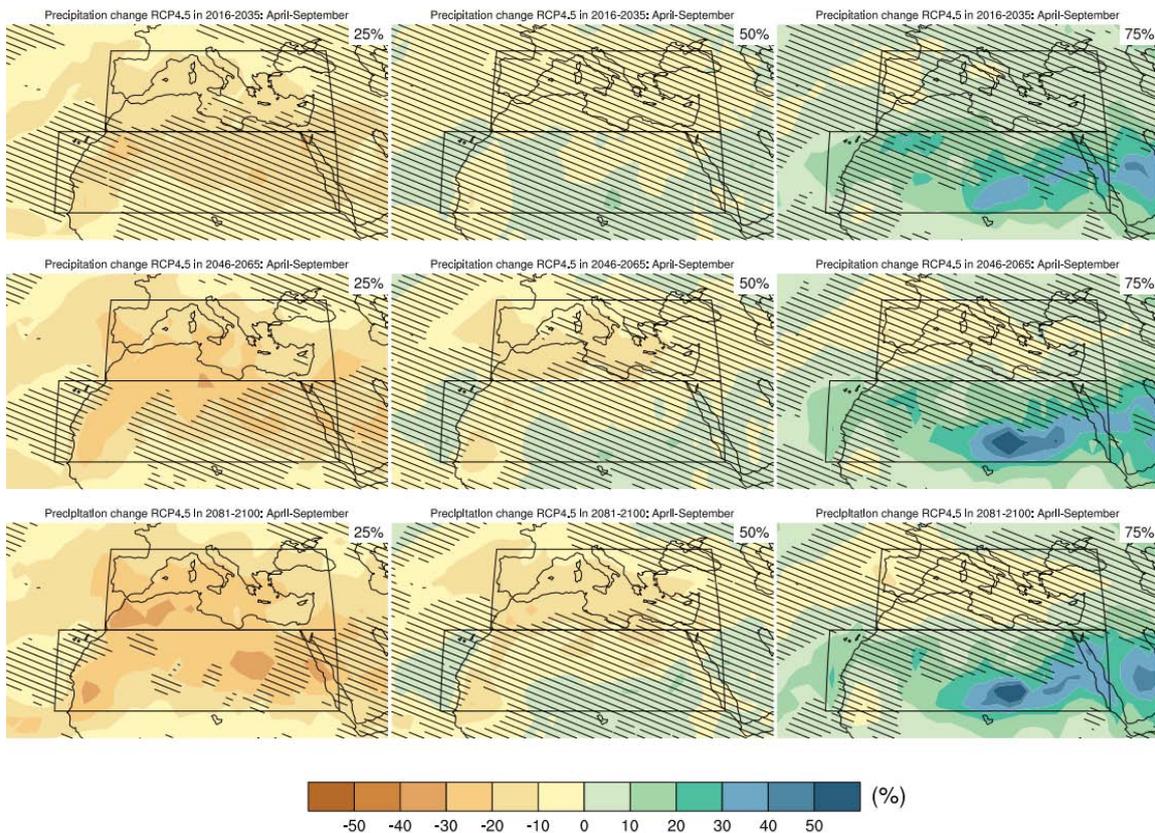


Figura 3.17. Mapas de cambios en la precipitación en Abril-Septiembre en 2016-2035, 2046-2065 y 2081-2100 con respecto al periodo 1986-2005 en el escenario RCP4.5. En cada punto de la rejilla espacial se muestran el percentil del 25, 50 y 75 % de la distribución del *ensemble* de modelos CMIP5. Las zonas rayadas representan áreas donde la diferencia en los percentiles en la media de los 20 años es menor que la desviación estándar de la variabilidad natural estimada a día de hoy. Fuente: IPCC, 2013.

Por otro lado, uno de los proyectos actuales de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) consiste en la generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España a partir de la información de los modelos globales utilizados por el IPCC. Se han empleado técnicas de regionalización estadística basados en los métodos de análogos y de regresión.

La figura 3.18 muestra las proyecciones de cambio de la precipitación anual acumulada media y su incertidumbre, obtenida como dos veces la desviación estándar. Los cambios observados en el escenario RCP4.5 oscilan en el entorno del 0, siendo en su mayoría ligeramente negativos. A largo plazo la reducción de precipitación es algo más acusada en algunos puntos del interior.

La tendencia que muestran los resultados para el escenario RCP8.5 es similar a la observada para el RCP4.5 pero con cambios de mayor magnitud. A final de siglo se aprecian disminuciones de hasta 20 mm.

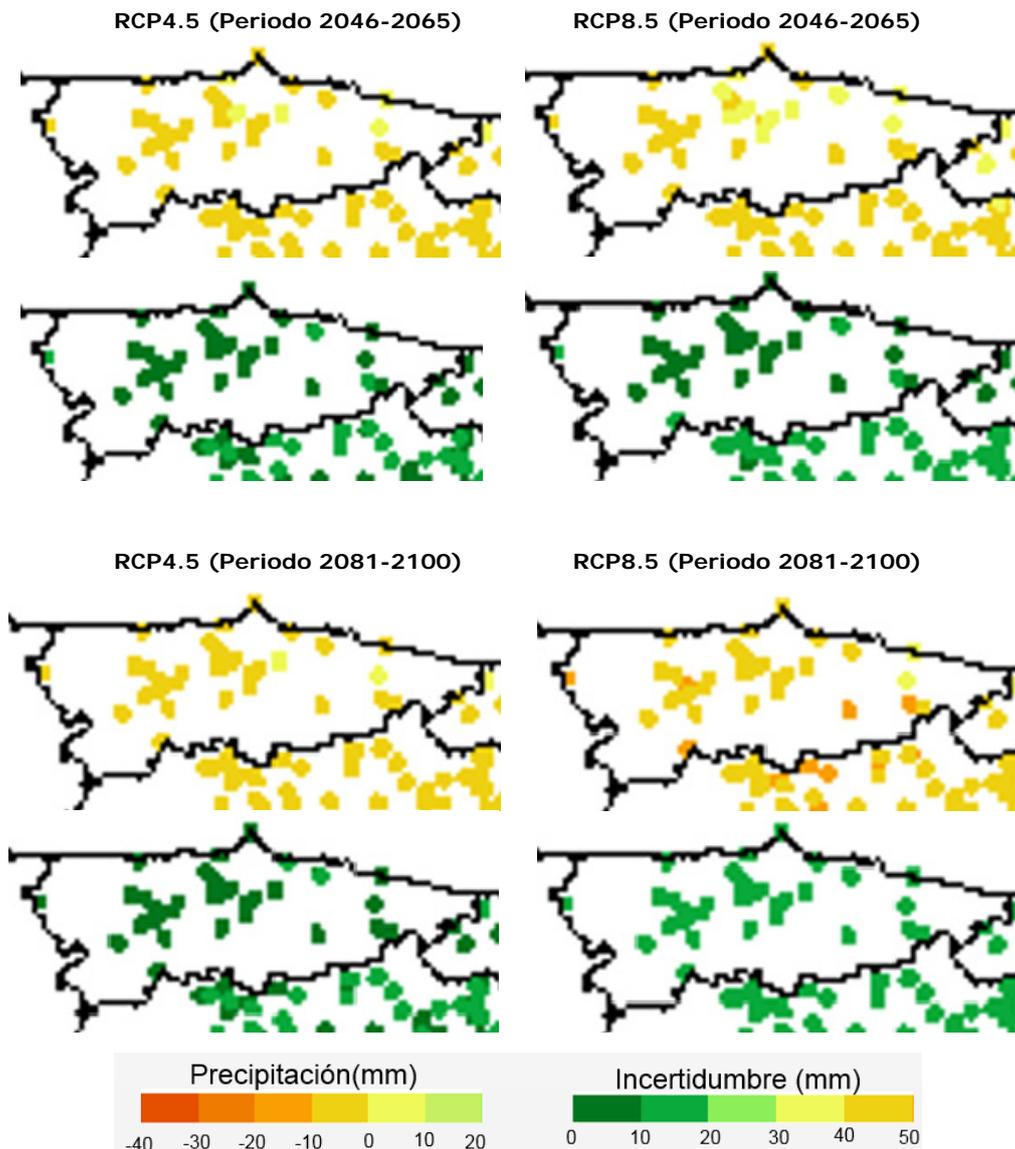


Figura 3.18. Cambios en la precipitación anual acumulada media (paneles superiores) e incertidumbre asociada (paneles inferiores) para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, respecto al periodo de control 1961-2000. Fuente: AEMET, 2015.

3.2.2. Temperatura del aire

La temperatura es una de las variables geofísicas más estudiadas y un claro indicador del calentamiento global. Tal y como muestran las figuras 3.19 y 3.20 la temperatura del aire ha aumentado durante el siglo XX y seguirá aumentando a lo largo del siglo XXI. En el invierno del Sur de Europa las proyecciones muestran aumentos en la temperatura a final de siglo de entre 2° y 4° para los RCP4.5 y RCP8.5 respectivamente. En el caso del verano las proyecciones de aumento para finales de siglo son mayores, con aumentos de 3° (RCP4.5) a 7° (RCP8.5).

Temperature change South Europe/Mediterranean December-February

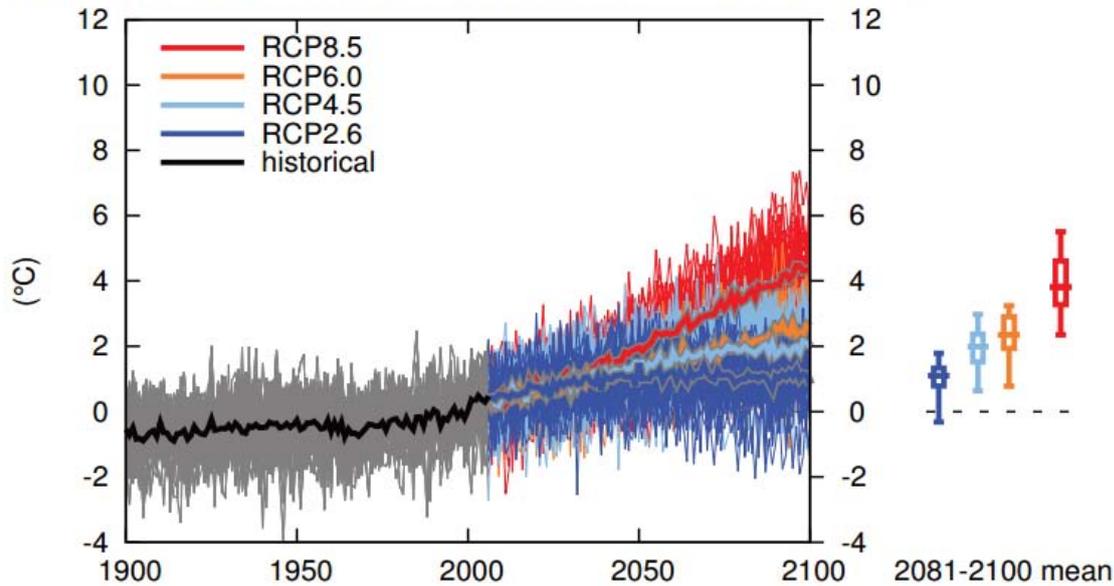


Figura 3.19. Serie temporal de cambios en la temperatura del sur de Europa/Mediterráneo en el período Diciembre-Febrero. Fuente: IPCC, 2013.

Temperature change South Europe/Mediterranean June-August

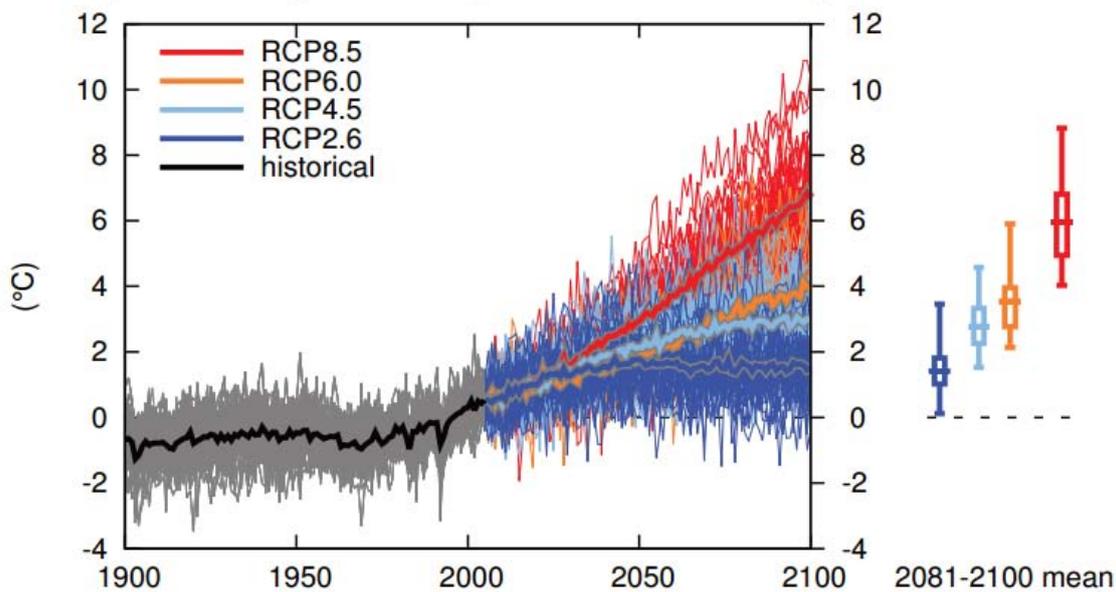


Figura 3.20. Serie temporal de cambios en la temperatura del sur de Europa/Mediterráneo en el período Junio-Agosto. Fuente: IPCC, 2013.

Los mapas espaciales (véanse las figuras 3.21 y 3.22) permiten ver la variabilidad de esos cambios regionalmente. En la zona de Asturias se proyectan cambios de aumento de entre 5° y 7° para el período 2081-2100, en la época estival, especialmente en el percentil del 75% de la temperatura (RCP4.5). En el invierno los aumentos proyectados son menores, pero en todos los casos están por encima de 1° a partir de la mitad de siglo.

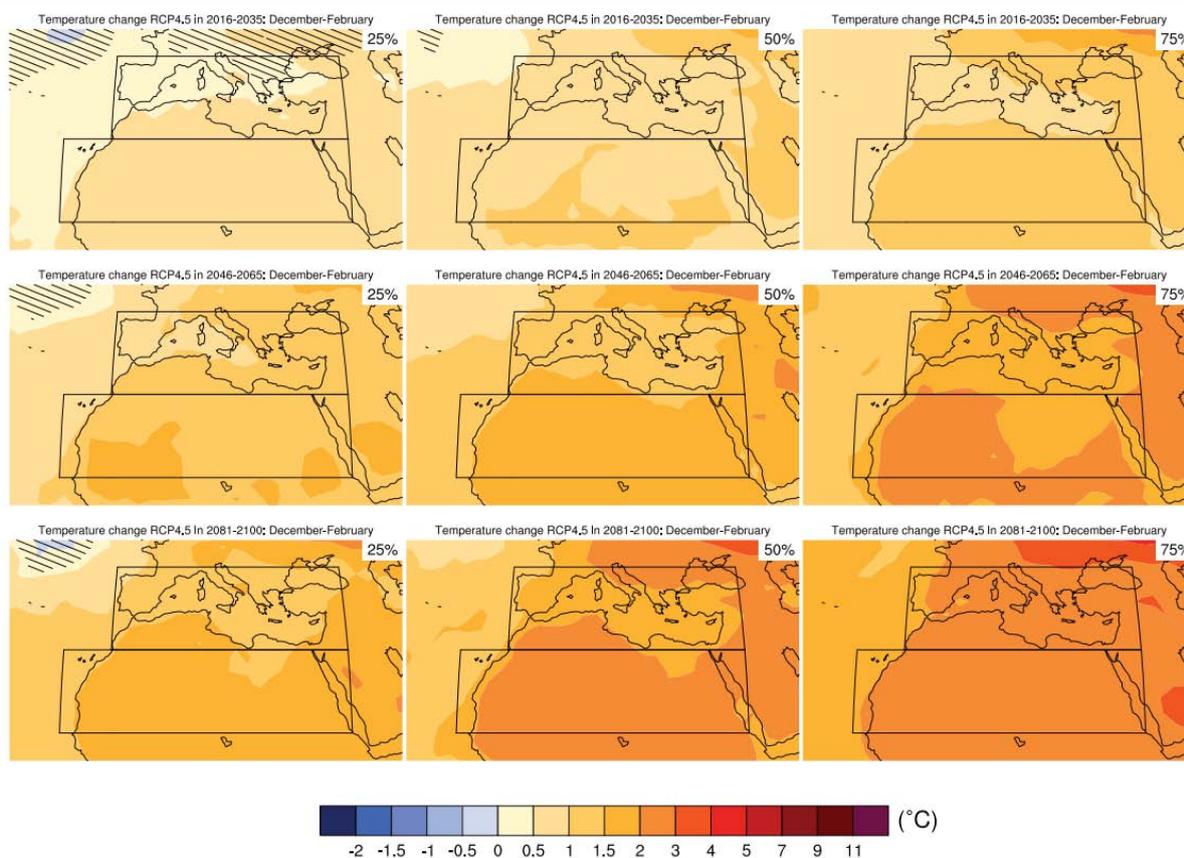


Figura 3.21. Mapas de cambios en la temperatura en Diciembre-Febrero en 2016-2035, 2046-2065 y 2081-2100 con respecto al periodo 1986-2005 en el escenario RCP4.5. En cada punto de la rejilla espacial se muestran el percentil del 25, 50 y 75 % de la distribución del *ensemble* de modelos CMIP5. Las zonas rayadas representan áreas donde la diferencia en los percentiles en la media de los 20 años es menor que la desviación estándar de la variabilidad natural estimada a día de hoy. Fuente: IPCC, 2013.

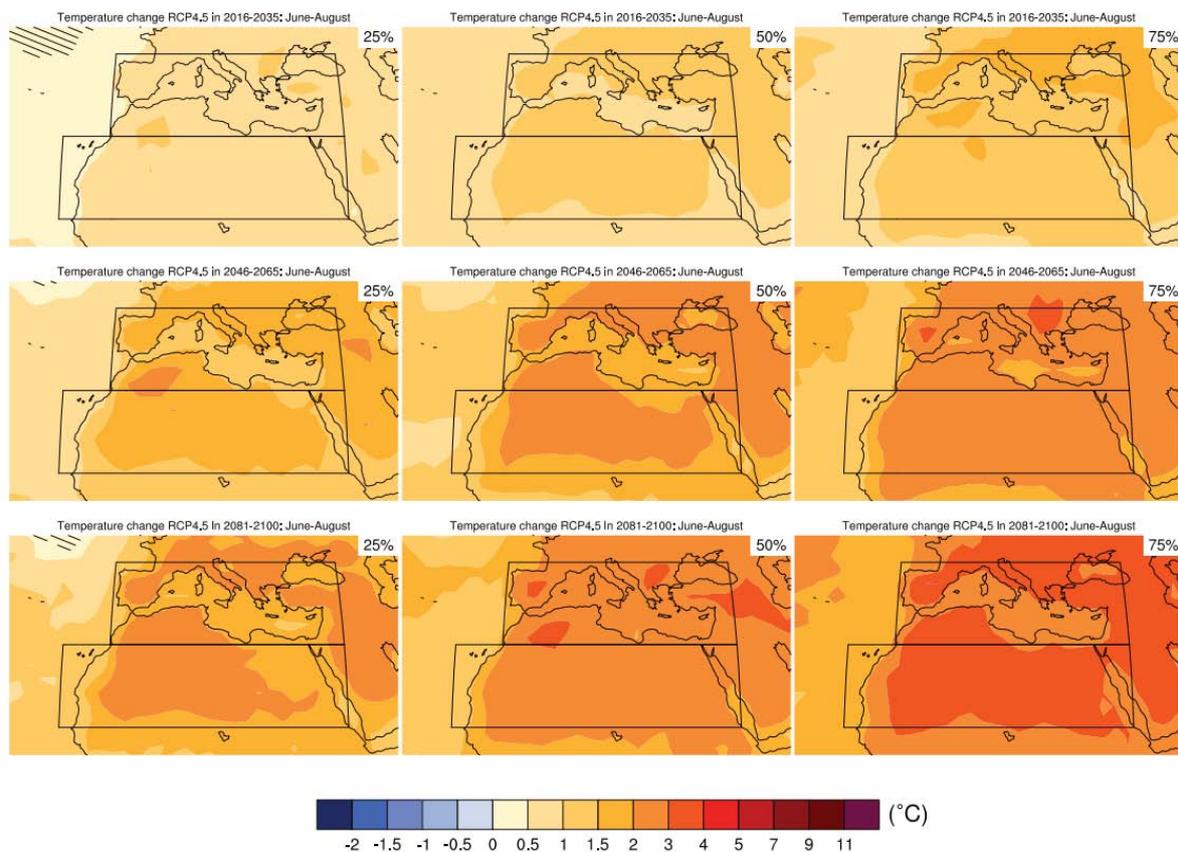


Figura 3.22. Mapas de cambios en la temperatura en Junio-Agosto en 2016-2035, 2046-2065 y 2081-2100 con respecto al período 1986-2005 en el escenario RCP4.5. En cada punto de la rejilla espacial se muestran el percentil del 25, 50 y 75 % de la distribución del *ensemble* de modelos CMIP5. Las zonas rayadas representan áreas donde la diferencia en los percentiles en la media de los 20 años es menor que la desviación estándar de la variabilidad natural estimada a día de hoy. Fuente: IPCC, 2013.

A continuación, se muestran los escenarios de temperatura atmosférica regionalizados desarrollados por la AEMET mediante técnicas estadísticas de análogos y regresión en el marco del proyecto de generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España. Se ha empleado la información de los modelos globales utilizados por el IPCC.

Las figuras 3.23 y 3.24 muestran las proyecciones de cambio de las temperaturas mínima y máxima anuales medias y su incertidumbre (2 veces la desviación estándar) a mitad y a final de siglo.

Los resultados obtenidos para el escenario RCP4.5 muestran, a mitad de siglo, un aumento de entre 1 y 2 grados en las temperaturas mínima y máxima anuales medias. A final de siglo se observa un aumento en torno a 3 grados de la temperatura mínima anual media. Para el RCP8.5 la tendencia es similar a la observada en los resultados del RCP4.5. La magnitud de aumento de temperatura, sin embargo, es algo mayor, y también lo es la incertidumbre, especialmente notable a finales de siglo.

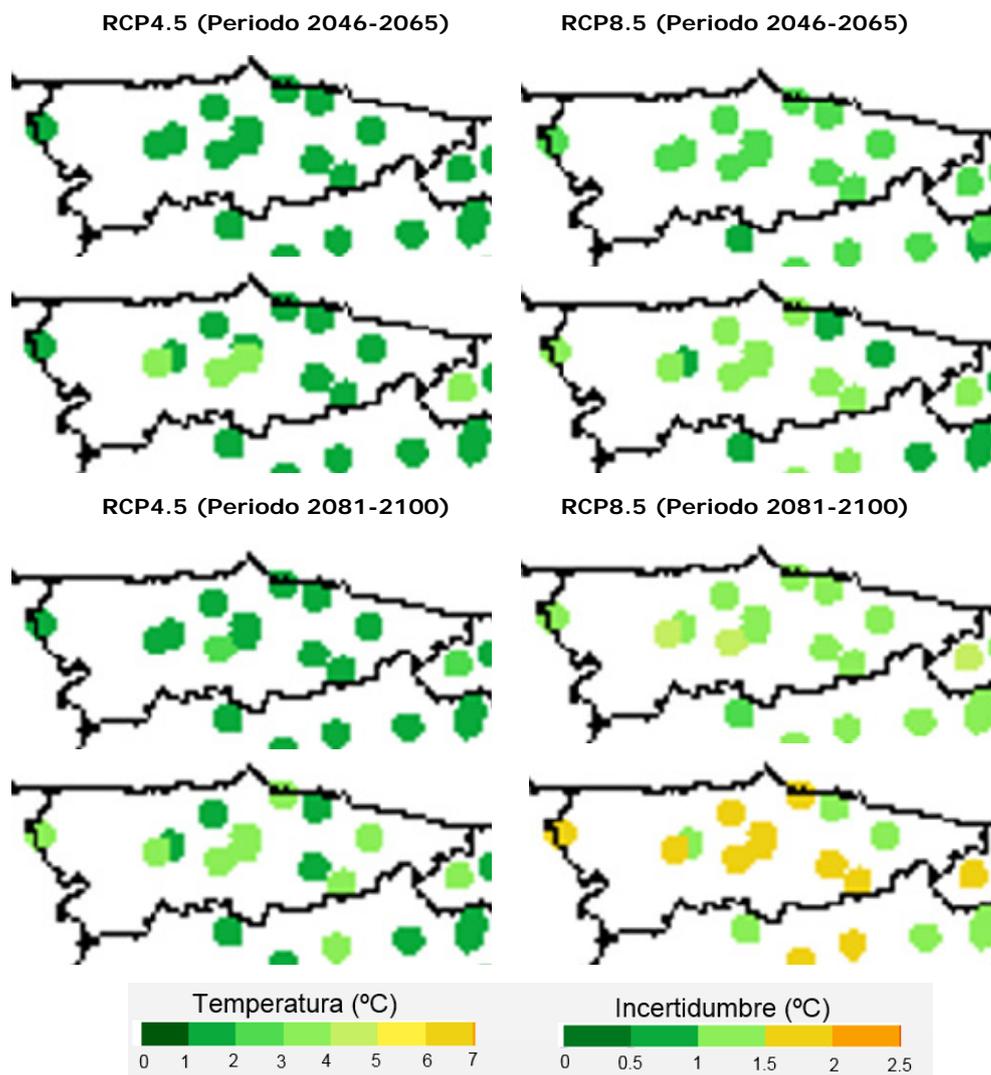


Figura 3.23. Cambios en la temperatura mínima anual media (paneles superiores) e incertidumbre (paneles inferiores) para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, respecto al periodo de control 1961-2000.

En el RCP8.5 se aprecia un aumento de la temperatura máxima anual media de entre 3 y 4 grados para el periodo 2046-2065 y de hasta 5 grados a finales del siglo XXI.

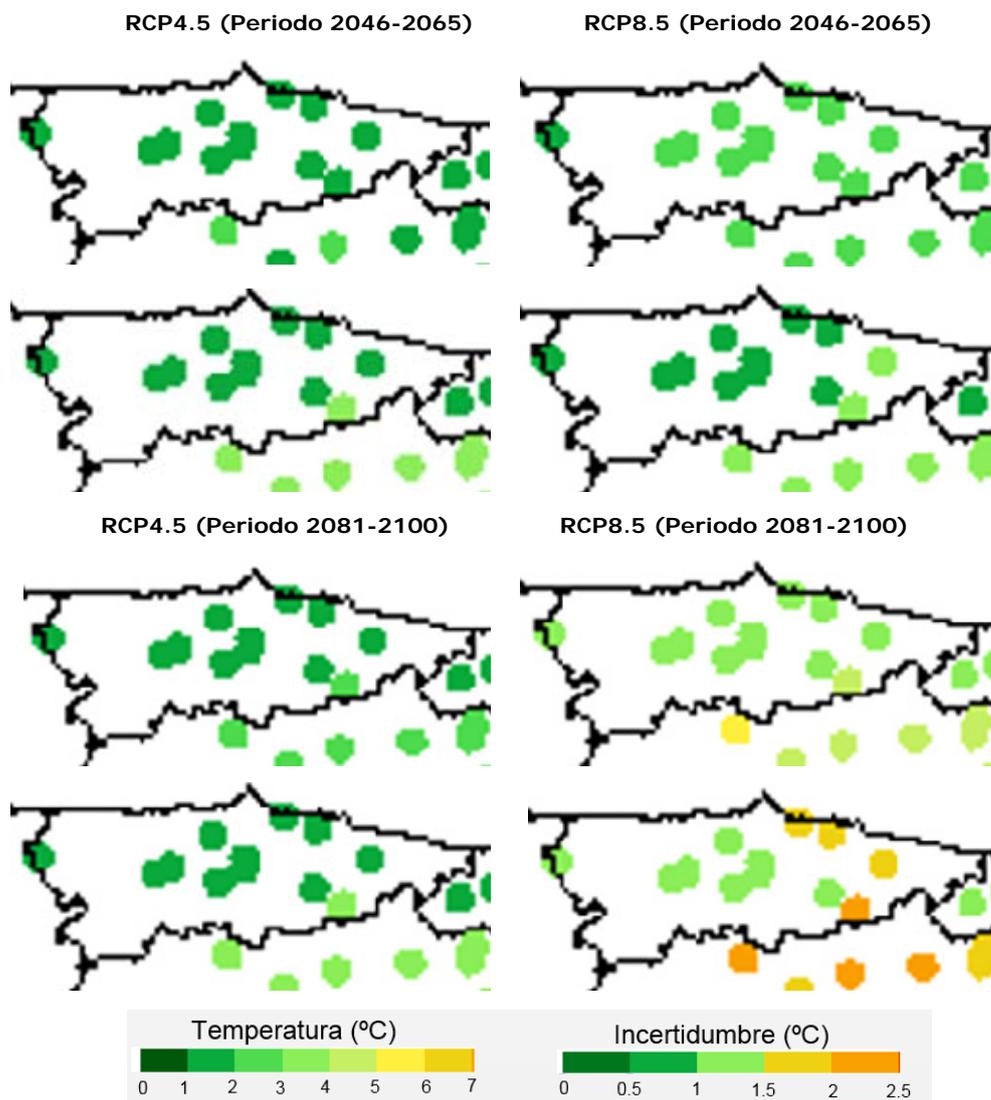


Figura 3.24. Cambios en la temperatura máxima anual media (paneles superiores) e incertidumbre (paneles inferiores) para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, respecto al periodo de control 1961-2000.

4. CONCLUSIONES

A lo largo de la Tarea 2.3 se ha realizado un análisis de las proyecciones de oleaje, nivel del mar y temperatura. Se han obtenido los cambios para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 y los períodos de tiempo 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099.

4.1. Metodología

La metodología aplicada se puede resumir en los siguientes puntos:

- Para estimar las proyecciones de oleaje y marea meteorológica se ha utilizado una metodología basada en tipos de tiempo, también aplicada al análisis de las tendencias históricas. Se ha hecho uso de las salidas de los modelos globales atmosféricos CMIP5, los cuales han sido analizados y seleccionados previamente comprobando su pericia.
- En el caso del nivel medio del mar, se han empleado proyecciones globales que han sido regionalizadas en la costa asturiana.
- Para realizar las proyecciones de la temperatura superficial del mar se han seleccionado 22 modelos climáticos globales cada uno de los cuales genera unas condiciones futuras del clima para los escenarios propuestos. Tras realizar su *ensemble*, se han obtenido proyecciones para el corto, medio y largo plazo resultado de la media de los modelos climáticos considerados.
- Hay que tener en cuenta que estas proyecciones están condicionadas por las hipótesis que se hacen de los forzamientos climáticos, afectados por las limitaciones de los modelos climáticos e inevitablemente sujetos a la variabilidad interna cuando consideramos un período específico de tiempo.

4.2. Resultados

A partir de los resultados obtenidos pueden extraerse las siguientes conclusiones particulares:

- Se produce una reducción en la H_{smedia} de forma general a lo largo de toda la costa, más acusada en las zonas orientadas al noroeste. En el RCP4.5 se alcanzan valores máximos de reducción del oleaje de 5 cm en las zonas de Avilés y Cudillero. En todos los períodos de tiempo el patrón es el mismo. En Gijón el cambio es ligeramente positivo en los períodos 2010-2039 y 2040-2069, y prácticamente nulo en el último tercio del siglo. En el RCP8.5 el patrón es muy similar, con valores negativos prácticamente en toda la costa salvo en algunos puntos orientados al noreste, entre ellos Gijón, donde el cambio es ligeramente positivo.
- Los cambios obtenidos para la $H_{95\%}$ muestran un patrón similar al de la H_{smedia} , pero son de mayor magnitud. Para el RCP4.5 la $H_{95\%}$ disminuye hasta 9 cm en algunos puntos de la costa occidental como Avilés o San Juan de la Arena. En la zona de Gijón y otros puntos de la costa oriental los cambios son ligeramente positivos. En el RCP8.5 se puede observar que el patrón es prácticamente el mismo, con valores de cambio ligeramente superiores a finales de siglo, disminuyendo la altura de ola hasta 12 cm.

- Los cambios en la marea meteorológica del percentil del 95 % (MM_{95%}) para el RCP4.5 muestran un patrón general de reducción, algo más acentuado en la costa occidental asturiana, que va aumentando a medida que transcurre el siglo XXI. La magnitud del cambio es muy pequeña, siendo a finales de siglo de apenas 0.7 cm. En el caso del RCP8.5, se observa un mismo patrón espacial y la tendencia a lo largo del siglo XXI es similar, con una ligera intensificación en los valores pero en ningún caso superando los 0.8 cm de disminución a finales de siglo.
- Las proyecciones de nivel del mar global han sido regionalizadas para las cuencas de todo el mundo por Slangen et al. (2014) en el período 2081-2100. En ambos casos se observa poca variabilidad espacial, con valores en torno a 0.47 m para el escenario RCP4.5 y a 0.62 para el escenario RCP8.5.
- En general, se observa un gradiente de Oeste a Este en el incremento de temperatura superficial del mar media. Este incremento es mayor a medida que los periodos son más lejanos, alcanzándose los máximos en el largo plazo (2070-2099). Así, para el RCP 8.5 los aumentos máximos en este periodo son superiores a un grado con respecto al escenario RCP 4.5 (1.69°C frente a 2.96°C). En cuanto a los cambios en las temperaturas mínimas, los valores son superiores a 0.4°C, llegando los máximos a 1.4°C para el RCP 4.5 en el largo plazo (2070-2099) y a 2.4°C para el RCP 8.5 en este mismo periodo. Para el período 2070-2099 y el RCP 8.5 se alcanzan incrementos de hasta 3.6°C en las temperaturas máximas. Los cambios estimados tanto para las temperaturas máximas como mínimas son de suficiente magnitud como afectar a la distribución geográfica de determinadas especies, siendo especialmente crítico para aquéllas que se encuentren en su límite de distribución.
- Los cambios observados en la precipitación anual acumulada media para el RCP4.5 oscilan en el entorno del 0, siendo en su mayoría ligeramente negativos. A largo plazo la reducción de precipitación es algo más acusada en algunos puntos del interior. La tendencia que muestran los resultados para el RCP8.5 es similar a la observada para el RCP4.5 pero con cambios de mayor magnitud. A final de siglo se aprecian disminuciones de hasta 20 mm en la precipitación anual acumulada media.
- Los resultados obtenidos para la temperatura atmosférica muestran, a mitad de siglo y para el RCP4.5, un aumento de entre 1 y 2 grados en las temperaturas mínima y máxima anuales medias. A final de siglo se observa un aumento en torno a 3 grados de la temperatura mínima anual media. Para el RCP8.5 la tendencia es parecida pero la magnitud de aumento algo mayor, y también lo es la incertidumbre, especialmente notable a finales de siglo. En el RCP8.5 se aprecia un aumento de la temperatura máxima anual media de entre 3 y 4 grados para el periodo 2046-2065 y de hasta 5 grados a finales del siglo XXI.

A nivel más general, se puede concluir lo siguiente:

- Los cambios más sustanciales se van a producir en el nivel medio del mar y en la temperatura superficial de las aguas. Por el contrario, las proyecciones de oleaje y marea meteorológica no muestran cambios significativos ni en los valores medios ni en los extremos.

5. REFERENCIAS

- Agencia Estatal de METeorología (AEMET): www.aemet.es (último acceso: julio de 2015).
- Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R., Tomas, A., y Izaguirre, C., 2013. High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas. *Coastal Engineering*, Vol. 72, pp 56-68.
- Camus, P. M. Menéndez, F.J. Méndez, C. Izaguirre, A. Espejo, V. Cánovas, J. Pérez, A. Rueda, I.J. Losada y R. Medina, 2014. A weather-type statistical downscaling framework for ocean wave climate. *Journal of Geophysical Research*, doi 10.1002/2014JC010141.
- Cid, A., S. Castanedo, A.J. Abascal, M. Menendez and, R. Medina, 2014. A high resolution hindcast of the meteorological sea level component for Southern Europe: the GOS dataset. *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-013-2041-0.
- Doney, S. C., Ruckelshaus, M., Emmett Duffy, J., Barry, J. P., Chan, F., English, C. a., ... Talley, L. D. (2012). Climate Change Impacts on Marine Ecosystems. *Annual Review of Marine Science*, 4, 11–37. doi:10.1146/annurev-marine-041911-111611
- Duarte, L., Viejo, R. M., Martínez, B., deCastro, M., Gómez-Gesteira, M., & Gallardo, T. (2013). Recent and historical range shifts of two canopy-forming seaweeds in North Spain and the link with trends in sea surface temperature. *Acta Oecologica*, 51, 1–10. doi:10.1016/j.actao.2013.05.002
- García, R., Holmer, M., Duarte, C.M., Marbà, N., 2013. Global warming enhances sulphide stress in a key seagrass species (NW Mediterranean). *Global Change Biology* 19, 3629–3639.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Working Group I. Contribution to the IPCC 5th Assessment Report.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Working Group II. Contribution to the IPCC 5th Assessment Report.
- Lee, K., Park, S.R., Kim, Y.K., 2007. Effects of irradiance, temperature, and nutrients on growth dynamics of seagrasses: a review. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 350, 144-175.
- Lüning, K., 1990. *Seaweeds. Their Environment, Biogeography, and Ecophysiology*. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.
- Meehl G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins et al. 2007. Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor y H. L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 747-846.
- Panigada, S., Zanardelli, M., MacKenzie, M., Donovan, C., Mélin, F., Hammond, P.S., 2008. Modelling habitat preferences for fin whales and striped dolphins in the Pelagos

- Sanctuary (Western Mediterranean Sea) with physiographic and remote sensing variables. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3400–3412.
- Pérez J., M. Méndez, M. Menéndez y I.J. Losada, 2014a. ESTELA: a method for evaluating the source and travel time of the wave energy reaching a local area. *Ocean Dynamics*, DOI 10.1007/s10236-014-0740-7.
- Pérez J., M. Menéndez, F.J. Méndez y I.J. Losada, 2014b. Evaluating the performance of CMIP3 and CMIP5 global climate models over the north-east Atlantic region. *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-014-2078-8.
- Ramos, E., Puente, A., Juanes, J.A., Neto, J.M., Pedersen, A., Bartsch, I., Scanlan, C., Wilkes, R., van den Bergh, E., Gall, E.A., Melo, R., 2014. Biological validation of physical coastal waters classification along the NE Atlantic region based on rocky macroalgae distribution. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 147, 103-112.
- Ramos, E., Puente, A., Juanes, J., 2015. An ecological classification of rocky shores at a regional scale: a predictive tool for management of conservation values. *Marine Ecology*. In press.
- Salman, A., Bilecenoglu, M., Güçlüsoy, H., 2001. Stomach contents of two Mediterranean monk seals (*Monachus monachus*) from the Aegean Sea, Turkey. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 84(4), 719-720.
- Slangen A.B.A., M. Carson, C.A. Katsman, R.S.W. van de Wal, A. Köhl, L.L.A. Vermeersen and D. Stammer, 2014. Modelling twenty-first century regional sea-level changes. *Climatic Change*, doi: 10.1007/s10584-014-1080-9.
- Wang, X.L., Feng, Y., Swail, V.R. (2014). Changes in global ocean wave heights as projected using multimodel CMIP5 simulations. *Geophysical Research Letters*, 41 (3), 1026–1034



TAREA 2.4:

IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL LITORAL ASTURIANO



1. INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras son altamente dinámicas, lo que da lugar a que presenten una elevada fragilidad y vulnerabilidad frente a cualquier tipo de presión externa, ya sea de origen natural o antropogénico. Estas zonas, especialmente sensibles a impulsores del cambio climático tales como el nivel del mar, la temperatura del océano y su acidez, presentan mayor exposición a una serie de peligrosidades. El cambio climático conlleva, además de una subida del nivel medio del mar, posibles alteraciones en la frecuencia, la intensidad, la extensión o la duración de eventos extremos. La combinación del aumento de nivel del mar y los cambios en los eventos extremos dan lugar a riesgos de inundación en zonas bajas y aceleran la erosión costera.

El objetivo de este trabajo es el de caracterizar los impactos del cambio climático en la costa del Principado de Asturias.

La estructura del presente documento es la siguiente:

- **Análisis de unidades del litoral:** el objetivo de este capítulo es el de identificar los impactos que se van a analizar de manera detallada a lo largo del documento y dejar constancia de las limitaciones de los datos y de los modelos numéricos utilizados.
- **Inundación:** en este capítulo se detalla metodología para caracterizar la inundación costera bajo las hipótesis de distintos escenarios de cambio climático que combinan proyecciones de aumento del nivel medio del mar y eventos extremos.
- **Erosión:** este capítulo muestra el análisis de los procesos litorales transversales en las playas del litoral asturiano. Se ha caracterizado la erosión asociada a efectos de corto plazo, debida al aumento del nivel medio del mar, y a una combinación de ambos.
- **Cambios morfodinámicos en estuarios:** en este capítulo se analizan los cambios en las características morfológicas de los principales estuarios asturianos por efecto del aumento del nivel medio del mar.

2. ANÁLISIS DE UNIDADES DEL LITORAL

2.1. Identificación de impactos

Los impactos considerados en este estudio son la inundación costera, la erosión en playas y los cambios en las características morfológicas de los estuarios.

La inundación en costa se puede producir, de forma temporal, por eventos que se consideran extremos debido a que se alcanzan cotas de nivel del agua del mar poco frecuentes. Por otro lado, la subida del nivel medio del mar debida al cambio climático es un factor predominante de la inundación costera que puede causar la pérdida permanente de terrenos en zonas bajas. Por ello, se ha estudiado el impacto de inundación causado tanto por eventos extremos como por inundación permanente. Con este objetivo, se ha utilizado un modelo hidrodinámico bidimensional y se han realizado diversos ejercicios de calibración con datos de campo.

La erosión costera es un impacto particularmente preocupante, especialmente en playas urbanas en las que, a diferencia de playas sin influencia antropogénica donde es posible un retranqueo natural a partir del movimiento tierra adentro del sistema dunar, no habría posibilidades de retroceso en el caso de que la costa erosionase. Para caracterizar la erosión de la mejor manera posible, se ha procedido a analizar las consecuencias de los efectos de corto y largo plazo mediante modelos de equilibrio basados en el perfil transversal.

El aumento de nivel por efecto del cambio climático conllevará alteraciones significativas en las características morfológicas de los estuarios y, por tanto, en el balance sedimentario de los mismos. Para evaluar este impacto se han aplicado diversos modelos de equilibrio adaptados a los estuarios asturianos.

En este estudio se incluye una descripción de cada impacto, las dinámicas que los generan, la metodología empleada, los escenarios de cambio climático considerados y los resultados obtenidos.

2.2. Identificación de limitaciones

Con el objetivo de interpretar de forma adecuada los resultados que se muestran en el presente documento es necesario hacer mención de las limitaciones asociadas a los datos y a los modelos numéricos utilizados.

La información topográfica de la que se dispone proviene de un Modelo Digital de Terreno (MDT) de 5 m de resolución horizontal basado en datos LiDAR. Pese a que la calidad del MDT en la zona de estudio es buena, se han encontrado deficiencias en la definición de defensas costeras y encauzamientos de los ríos, ya que una resolución de 5 m es alta pero no suficiente para captar la orografía real del terreno en su totalidad. Se ha podido mejorar la calidad sólo de aquellas zonas críticas de las que se ha dispuesto de planos o datos cartográficos.

No se ha obtenido información contrastada sobre el régimen de precipitaciones en el Principado de Asturias. Por este motivo, sólo se ha implementado lluvia en los test de sensibilidad del modelo. Los datos de caudal de los que se dispone, por otro lado, no son suficientes para llevar a cabo un tratamiento estadístico al nivel del realizado en el caso de las dinámicas costeras y, por tanto, no ha sido posible plantear escenarios con combinaciones estadísticas de ambos. Por ello, se ha optado por simular en cada uno de los escenarios propuestos un caudal medio en los cauces más representativos.

La selección del modelo de inundación empleado radica en su bajo coste computacional, la posibilidad de incluir diversas fuentes de descarga e implementar rugosidades locales y su idoneidad para la escala espacial a la que se ha trabajado en este estudio. Sin embargo, no es el modelo más adecuado para reproducir la inundación en estuarios pues no propaga la onda de marea en los mismos.

El retroceso de la línea de costa depende de numerosos parámetros y para su determinación es necesario asumir ciertas hipótesis simplificadoras como suponer todas las playas encajadas, el tamaño del grano homogéneo en cada una de ellas, la altura de berma constante y la conservación del sedimento en el sistema. Por este motivo, es necesario disponer de datos de campo para calibrar las constantes del modelo utilizado y reducir de algún modo el elevado grado de incertidumbre.

Para analizar los cambios morfológicos en los estuarios debidos al aumento del nivel del mar se ha aplicado lo que se conoce como "modelos de equilibrio". Se trata de formulaciones empíricas que establecen relaciones de equilibrio entre los elementos morfológicos de un estuario y su prisma de marea, empleando unos coeficientes de proporcionalidad que deben ser calibrados y validados en la zona de estudio. Las principales limitaciones encontradas en su aplicación son las siguientes:

- Empleo de formulaciones empíricas que dependen exclusivamente del prisma de marea y del área ocupada por cada estuario. Aunque estas formulaciones empíricas suelen funcionar bien en este tipo de estuarios, hay que tener en cuenta que se está despreciando el efecto del oleaje en la zona exterior (bajo exterior y desembocadura) y el fluvial en la zona interior (bajos y canales interiores).
- Falta de batimetrías históricas y datos de actuaciones antrópicas (rellenos, dragados, cierres, aberturas...) que permitan calibrar y validar los modelos empleados.
- Insuficiente caracterización batimétrica de los estuarios de estudio. Esto introduce incertidumbre en la definición de los elementos morfológicos.
- Falta de datos de aportes sedimentarios que permitan conocer la tasa de crecimiento de la cota de los bajos interiores de los estuarios.

3. INUNDACIÓN

3.1. Introducción

Una de las principales amenazas para los sistemas costeros y las zonas bajas de todo el mundo es el aumento de la inundación debido a los efectos del cambio climático, fundamentalmente al aumento del nivel medio del mar.

Muchas veces nos referimos a la inundación costera como a la superación de un determinado nivel del mar al que usualmente llegan las aguas de manera que se generan daños sobre el sistema socioeconómico y natural. Esto responde a eventos extremos de inundación que ocurren de forma debido a la interacción de varios factores y tras los cuales el nivel de las aguas vuelve a su situación media. Sin embargo, la subida del nivel medio del mar debido al cambio climático implica la inundación permanente de terrenos, especialmente zonas bajas de la costa, perdiendo su uso y disfrute. Por consiguiente, podemos distinguir dos tipos de inundaciones costeras: la inundación permanente debida al aumento del nivel medio del mar y la inundación potencial a causa de eventos extremos. Debido a esta doble dimensión del problema, por un lado la inundación de eventos extremos durante un tiempo determinado y, por otro, la pérdida permanente de suelo por ascenso del nivel medio del mar, es fundamental contemplar ambas.

La metodología que se plantea en el presente informe contempla la caracterización de la inundación mediante un modelo hidrodinámico bidimensional bajo las hipótesis de distintos escenarios de cambio climático que combinan proyecciones de aumento del nivel medio del mar y eventos extremos, estos últimos tratados estadísticamente.

3.2. Dinámicas generadoras de la inundación

El análisis del riesgo requiere, en primer lugar, de la definición de la magnitud y duración de la peligrosidad. La inundación costera depende principalmente del oleaje, la marea meteorológica (MM), la marea astronómica (MA) y el aumento del nivel medio del mar (véase la figura 3.1). Estas variables se combinan en un índice de nivel del mar total (denominado TWL de sus siglas en inglés), definido como la suma lineal de la MM, la MA y 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 (set-up), éste último término calculado mediante la formulación de Stockdon et al. (2006). Por otro lado, y el caso de tratarse de un escenario de aumento del nivel medio del mar, el TWL exigiría la incorporación del término SLR (siglas de *Sea Level Rise*, en inglés) para introducir el incremento de nivel en la formulación.

$$TWL = MM + MA + SETUP + SLR \quad (3.1)$$

Con:

$$SETUP = \alpha \sqrt{H_s L_0} \quad (3.2)$$

Donde α es un parámetro a determinar mediante calibración, H_s es la altura de ola significativa y L_0 es la longitud de onda en aguas indefinidas.

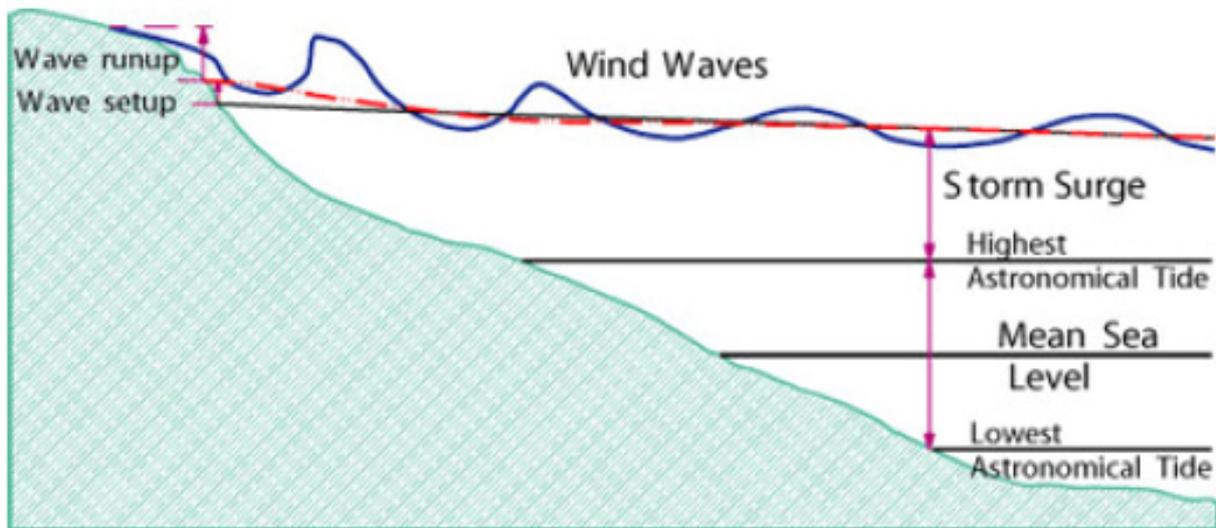


Figura 3.1. Esquema de la cota de inundación y sus componentes.

Las bases de datos históricas de oleaje (DOW, Camus et al., 2013) y MM (GOS, Cid et al., 2014) junto con la reconstrucción de la MA han permitido realizar la reconstrucción histórica del TWL a lo largo de la costa del Principado de Asturias, permitiendo analizar su régimen extremal y obtener los cuantiles asociados a periodos de retorno elevados, causantes de los eventos extremos de inundación.

3.3. Exposición

La exposición es una parte fundamental de la metodología y hace referencia al tipo y al grado en que un sistema está expuesto a variaciones climáticas importantes. El litoral asturiano cuenta con 400 km² de costa, de los cuales la mitad son acantilados de gran altitud. Cuenta con más de 200 playas y con 24 puertos, dos de ellos de interés general y, el resto, competencia del Principado de Asturias, la mayoría de uso náutico-pesquero.

Para evaluar la exposición, vinculada a las características físicas del entorno, es necesaria una buena caracterización de los elementos que configuran la costa: playas, acantilados, humedales y, muy especialmente, las defensas costeras, que ejercen de sistema de protección frente a inundaciones y erosiones.

En este estudio se ha empleado un Modelo Digital de Terreno (MDT) del Instituto Geográfico Nacional (IGN) basado en datos LiDAR de 5 metros de resolución horizontal (véase la figura 3.2).

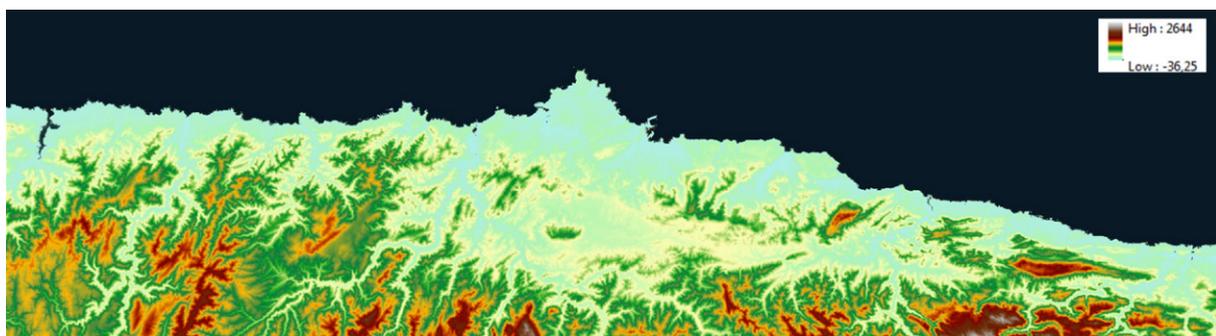


Figura 3.2. Modelo Digital de Terreno de 5 m de resolución horizontal basado en datos LiDAR (Fuente: IGN).

Pese ser un MDT de alta resolución, ha sido necesaria la digitalización de una línea de costa que se ajuste perfectamente a la orografía del territorio y con un criterio homogéneo de bajamar para cada una de las playas (véanse las figuras 3.3 y 3.4).



Figura 3.3. Línea de costa digitalizada a lo largo del litoral asturiano (Fuente: elaboración propia).



Figura 3.4. Detalle de la línea de costa digitalizada (Fuente: elaboración propia).

Por otro lado, el requerimiento de una buena definición de las defensas costeras ha llevado a la necesidad de digitalizar cada uno de los puertos del Principado de Asturias a partir de planos facilitados por su Servicio de Puertos e Infraestructuras de Transporte. Las figuras 3.5 y 3.6 muestran algunos ejemplos de los resultados obtenidos.

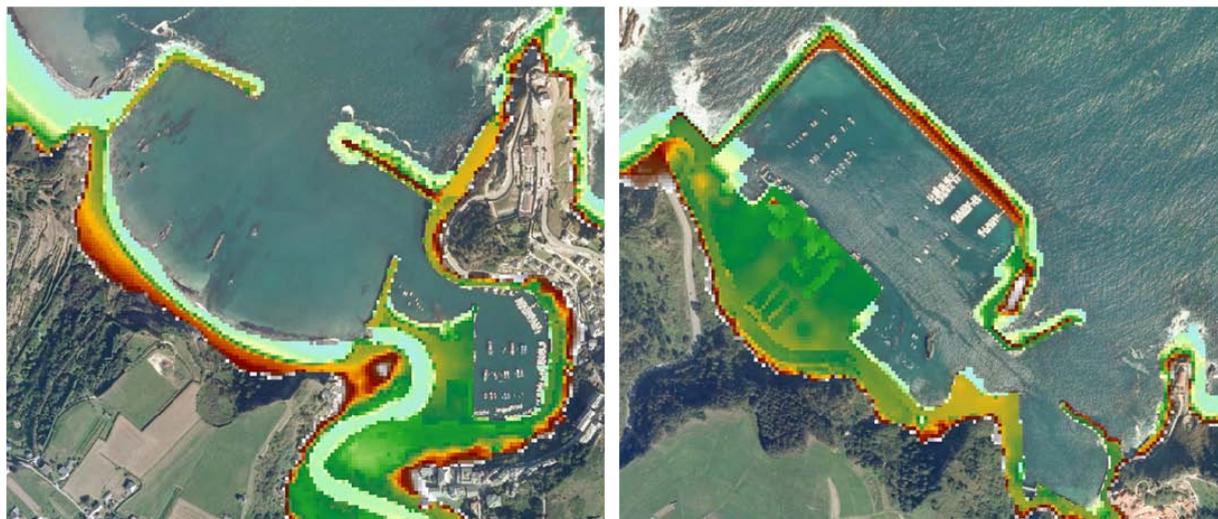


Figura 3.5. Puerto de Candás (panel izquierdo) y Puerto de Cudillero (panel derecho) tras digitalizar sus defensas (Fuente: elaboración propia).

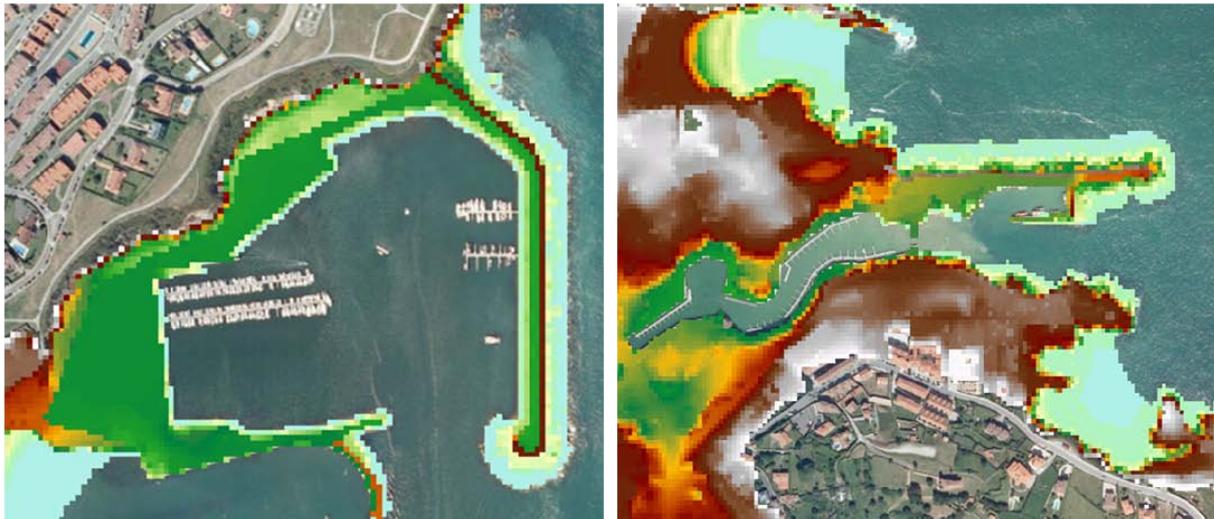


Figura 3.6. Puerto de Luanco (panel izquierdo) y Puerto de Llanes (panel derecho) tras digitalizar sus defensas (Fuente: elaboración propia).

Finalmente, se ha asignado a cada celda del MDT un coeficiente de rugosidad de Manning asociado a los distintos tipos de suelo (véase la figura 3.7). Este parámetro, fundamental para el cálculo hidráulico, ha sido posteriormente implementado en el modelo de inundación.



Figura 3.7. Distribución espacial de rugosidades en función del uso del suelo (Fuente: elaboración propia).

3.4. Modelado de la inundación

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

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

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

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

La malla computacional que utiliza RFSM-EDA se basa en la topografía subyacente y está formada por IZs, una serie de polígonos irregulares. Cada una de las IZs está compuesta por celdas (llamadas Impact Cells) que drenan al mismo punto bajo, conocido como Punto de Acumulación. Las interfaces entre IZs son crestas topográficas o puntos altos. La cota más baja de cada interfaz entre IZs corresponde al punto a través del cual el agua fluye entre celdas y se conoce como Punto de Comunicación (véanse las figuras 3.7 y 3.8).

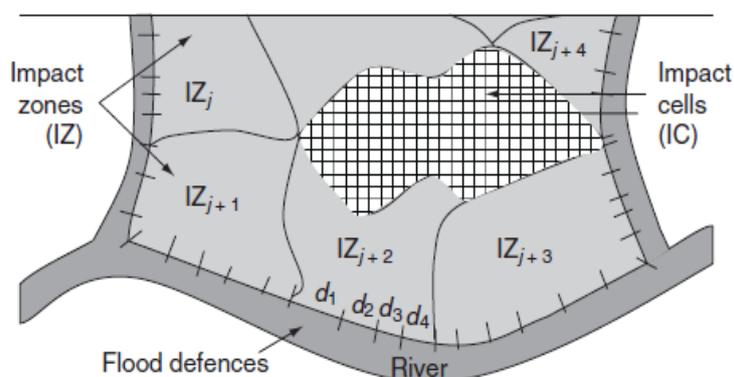


Figura 3.8. Representación conceptual de las Impact Zones (Gouldy *et al.*, 2008).

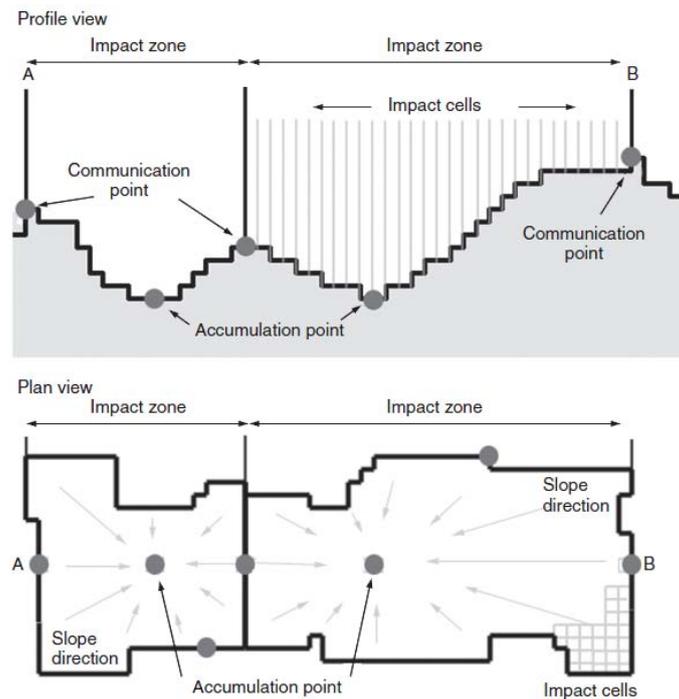


Figura 3.9. Representación conceptual de los Puntos de Acumulación y Comunicación en una IZ (Gouldby *et al.*, 2008).

Durante la simulación hidráulica, el modelo recibe volúmenes de descarga en la llanura de inundación a través de cada IZ costera (véase la figura 3.9). Esos volúmenes de inundación se computan como la diferencia entre el TWL del punto más cercano del conjunto de puntos en los que se ha reconstruido la serie de nivel y el correspondiente contorno.

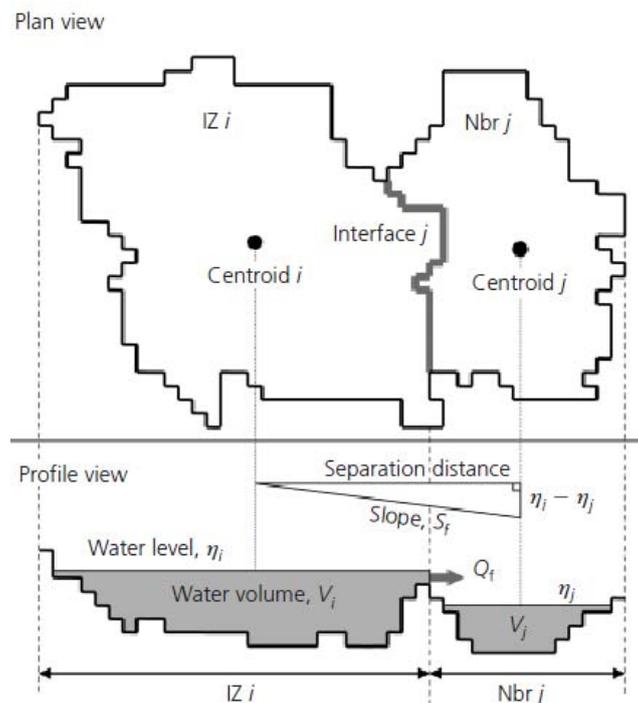


Figura 3.10. Representación conceptual de dos IZs adyacentes (Jamieson *et al.*, 2012).

El flujo entre dos IZs se calcula mediante la ecuación de momento:

$$Q_f^{t+\Delta t} = \sum_p \frac{(Q_p^t - g \cdot \Delta t \cdot A_p^t \cdot S_f^t)}{1 + g \cdot \Delta t \cdot n^2 \cdot |Q_p^t| / A_p^t \cdot (R_p^t)^{4/3}} \quad (3.3)$$

Donde Q_f es el flujo que pasa a través de la interfaz (m^3/s), Q_p es el flujo en cada sub-elemento celda (m^3/s), Δt es el paso de tiempo (s), g es la aceleración de la gravedad (m/s^2), A_p es el área de la celda (m^2), R_p es el radio hidráulico, que incluye fricción vertical y horizontal (m), n es el coeficiente de rugosidad de Manning y S_f es la pendiente de la superficie del agua, calculada como la diferencia entre niveles de IZs adyacentes dividida entre la distancia que separa sus centroides.

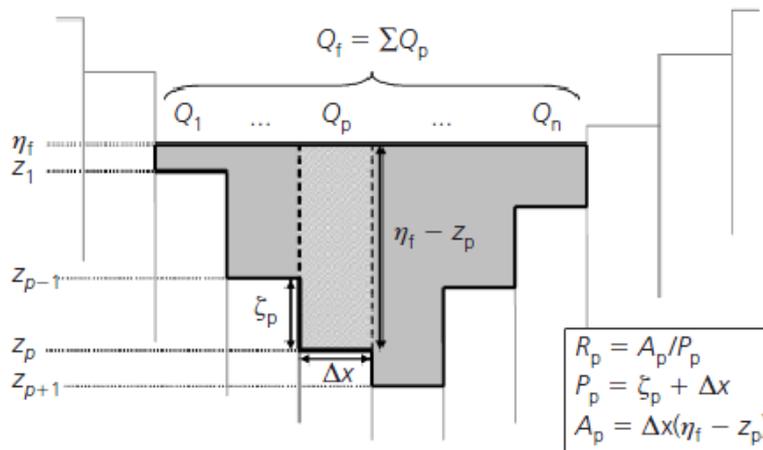


Figure 3.11. Representación conceptual de la sección transversal de una interfaz entre dos IZs adyacentes (Jamieson et al., 2012).

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

$$(3.4) \quad V_i^{t+\Delta t} = V_i^t + \Delta t \cdot \sum_{j=1}^n Q_j^{t+\Delta t}$$

Donde V_i es el volumen de la IZ $_i$ (m^3) y n es el conjunto de IZs adyacentes. La estabilidad del modelo y, por tanto su paso de tiempo adaptativo, están sujetos a la condición de Courant-Freidrichs-Lewy (CFL), que se satisface asegurando que el dominio de dependencia de las interfaces de una IZ no excede el área de la IZ. El máximo paso de tiempo admisible viene dado por la siguiente expresión:

$$\Delta t_{\max} = \alpha_{\min} \frac{A_i}{\sum_j w_f \cdot \max(\|u_i^t\| + c_i^t, \|u_j^t\| + c_j^t)} \quad (3.5)$$

Donde α es el parámetro utilizado para escalar el paso de tiempo, A_i es el área de la IZ $_i$ (m^2), w_f es la anchura de la interfaz (m), u_i es la magnitud del vector velocidad de la IZ $_i$ (m/s) y c_i es la celeridad de la onda (m/s). El hecho de que RFSM-EDA tenga como sub-elemento de la malla computacional la propia topografía es una ventaja y a la vez una limitación pues la resolución del MDT restringe la calidad y fiabilidad de los resultados del modelo. Por otro lado, cabe puntualizar que no es el modelo más adecuado para resolver la inundación en estuarios ya que no propaga la onda de marea.

3.5. Metodología de inundación

3.5.1. Mallas de cómputo

La costa del Principado de Asturias tiene una longitud de 400 km lo cual imposibilita el empleo de una única malla computacional. Para abordar el problema, se ha dividido el área de estudio en 6 sub-zonas de aproximadamente 60 km de longitud cada una (véase la figura 3.12), asegurando un solape de 1 km entre cada una de ellas.

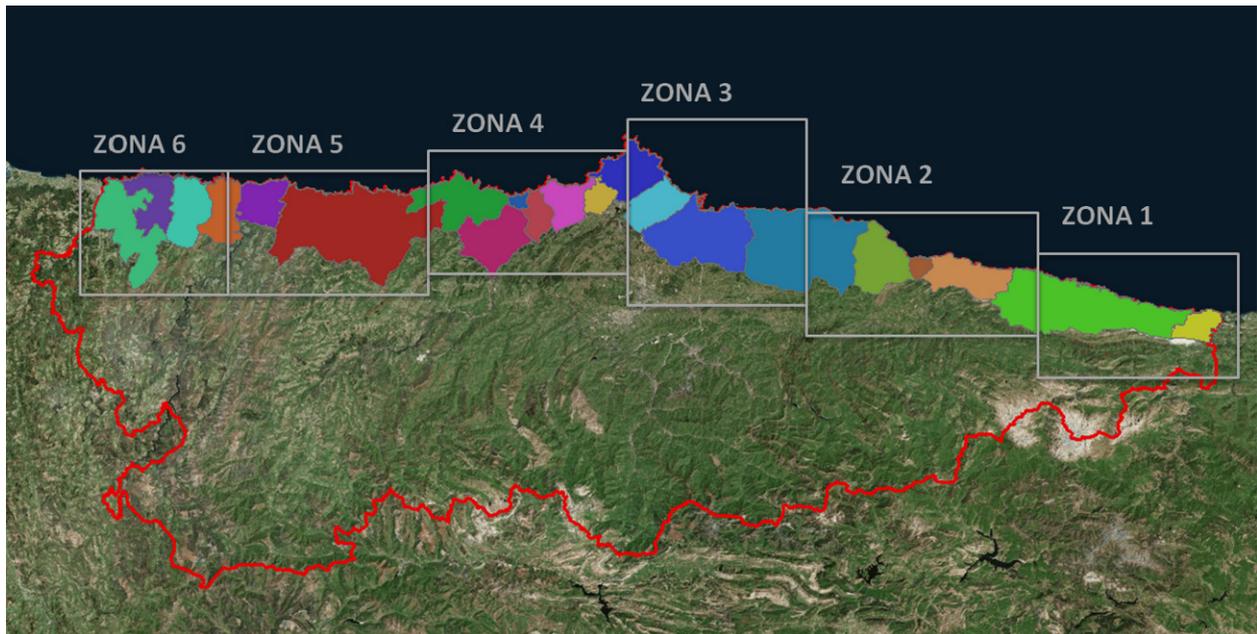


Figure 3.12. Distribución espacial de las zonas de estudio.

Se han realizado diversos test hasta obtener mallas adecuadas para lograr un equilibrio entre el coste computacional y la estabilidad en la simulación. Las IZ obtenidas tienen una superficie media de 3500 m².

A continuación, se muestra una imagen general con la distribución espacial de las diferentes mallas de cómputo (véase la figura 3.13) además de imágenes de detalle de cada una de ellas (figuras 3.14-3.19).



Figura 3.13. Distribución espacial de las mallas computacionales de RFSM-EDA.

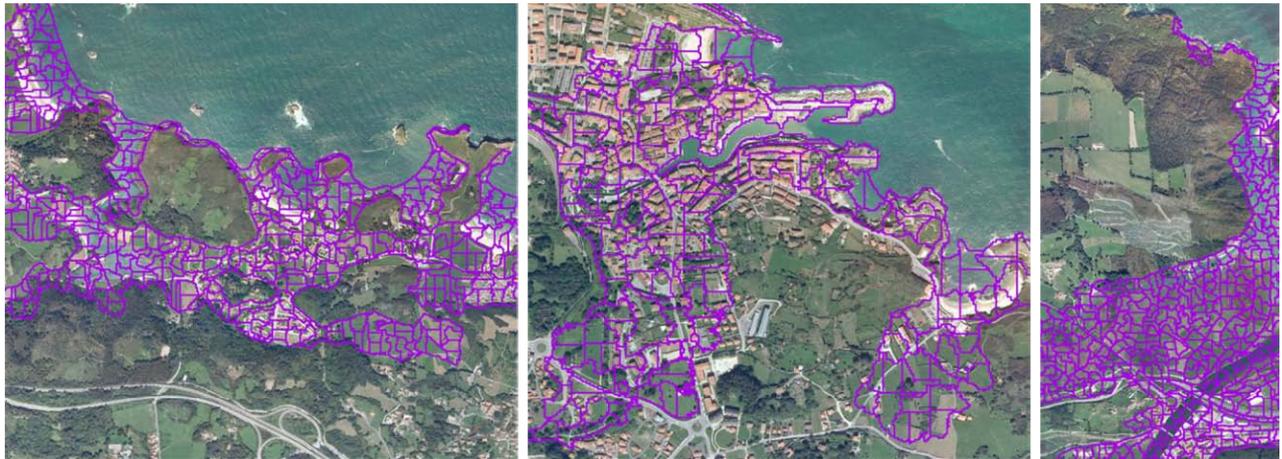


Figura 3.14. Detalle de la malla computacional de la zona 1 .



Figura 3.15. Detalle de la malla computacional de la zona 2 .



Figura 3.16. Detalle de la malla computacional de la zona 3 .



Figura 3.17. Detalle de la malla computacional de la zona 4 .

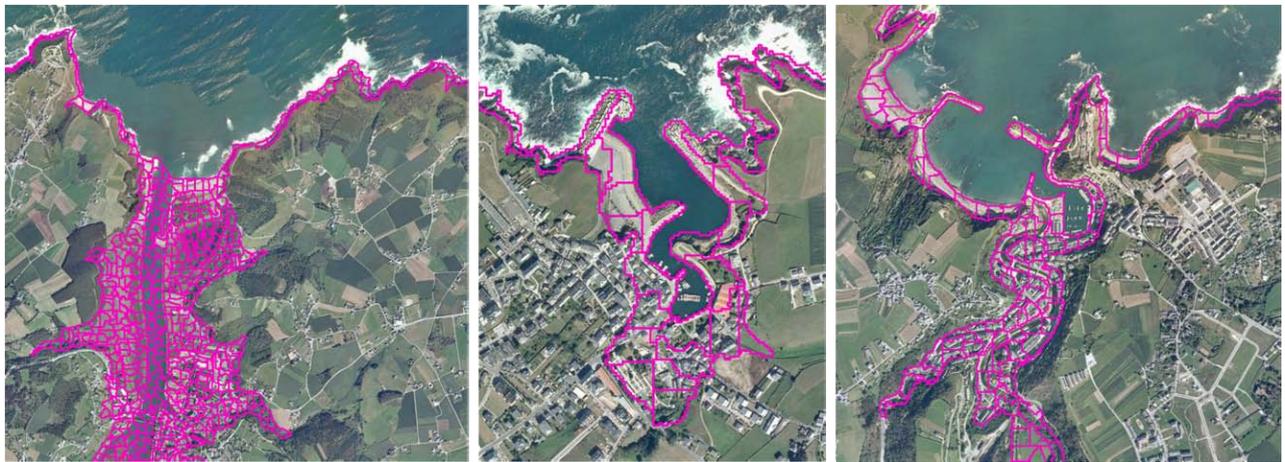


Figura 3.18. Detalle de la malla computacional de la zona 5 .

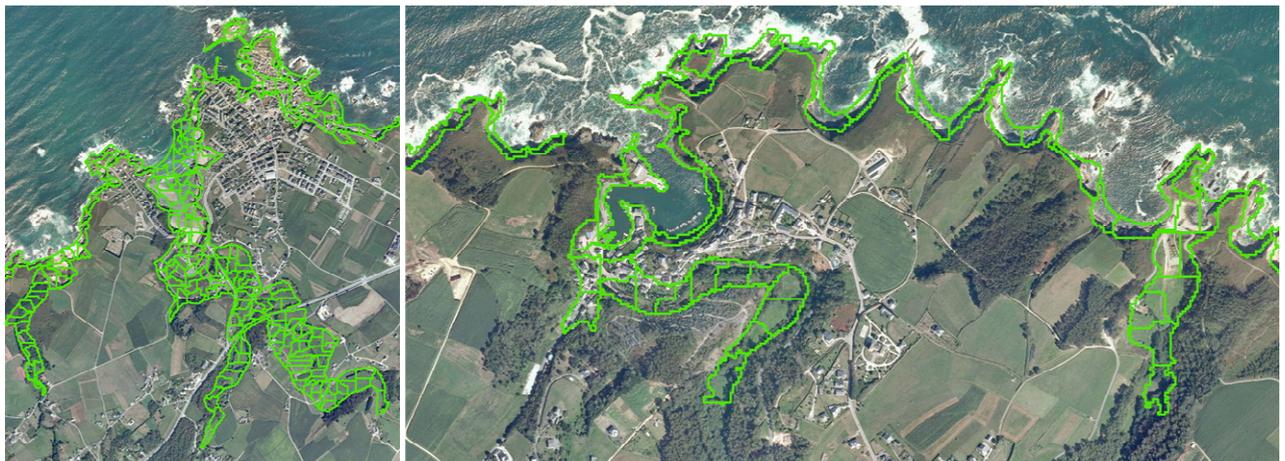


Figura 3.19. Detalle de la malla computacional de la zona 6 .

3.5.2. Calibración de los inputs del modelo

Con el objetivo de minimizar la incertidumbre asociada a la contribución del oleaje al valor del TWL se ha realizado un ejercicio de calibración con datos de campo obtenidos por IHCantabria tras el temporal del 2 de febrero de 2014. Por otro lado, el proceso para determinar la contribución del oleaje al valor de la cota de inundación ha sido algo más complejo. Pese a que la base de datos de oleaje en costa que se ha manejado (DOW) es de alta resolución, no contempla los efectos locales sobre el oleaje debido a la presencia de estructuras de defensa portuarias (difracción).

IHCantabria realizó una campaña de campo para evaluar los daños causados por el temporal en el Principado de Asturias. Con este objetivo, se discretizó la costa asturiana en 4 zonas (véase la figura 3.20) y se dispuso un equipo de trabajo en cada una de ellas.

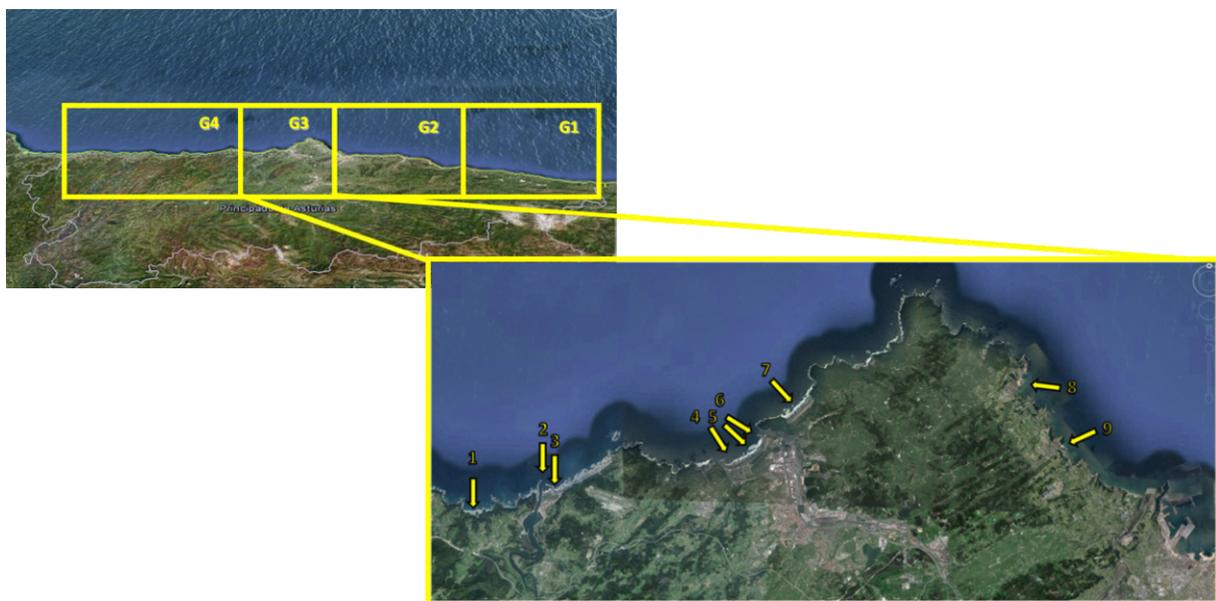


Figura 3.20. Distribución espacial de los 4 grupos de trabajo para la campaña de campo realizada en Asturias tras el temporal del 2 de febrero de 2014.

Se visitaron playas, puertos y estuarios para evaluar su grado de afección, se midió la extensión aproximada de la inundación en base a marcas de agua y testigos oculares, se tomaron fotos y se grabaron algunos vídeos. Tras finalizar los trabajos, se crearon bases de datos en Sistemas de Información Geográfica con información espacial sobre el alcance de los eventos y se realizaron diversos inventarios (véase la figura 3.21).

ASISTENCIA TÉCNICA A LA ELABORACIÓN DE UN ESTUDIO SOBRE
LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA COSTA DEL PRINCIPADO DE ASTURIAS
IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL LITORAL ASTURIANO

TAREA 2.4

Figura 3.21. Inventarios con datos sobre puertos, playas y estuarios realizados tras la campaña de campo

A continuación, se muestran imágenes de Luanco, uno de los lugares más afectados por los temporales de 2014 (figura 3.22), y de la inundación sufrida en Tazonés (figura 3.23).



Figura 3.22. Luanco: rebase sobre la defensa del paseo marítimo (panel izquierdo). Desperfectos tras el temporal (panel derecho).



Figura 3.23. Tazonés: inundación (panel izquierdo). Restos de arena cubren las zonas que han estado inundadas (panel derecho).

Dado que la formulación de Stockdon et al. (2006) utilizada para determinar el set-up del oleaje es función de un parámetro α que depende de la tipología de la costa, se ha intentado discernir entre los distintos elementos que conforman el litoral cantábrico: playas, acantilados y puertos. De este modo, y tras simular el evento extremo acontecido el 2 de febrero de 2014 para un rango de valores de α entre 0.04 y 0.09, se determinó un coeficiente α para playas y otro distinto para contornos verticales, es decir, para acantilados y puertos. La figura 3.24 muestra los resultados del test de calibración realizado con los datos de la campaña de campo en el Puerto de Luarca.

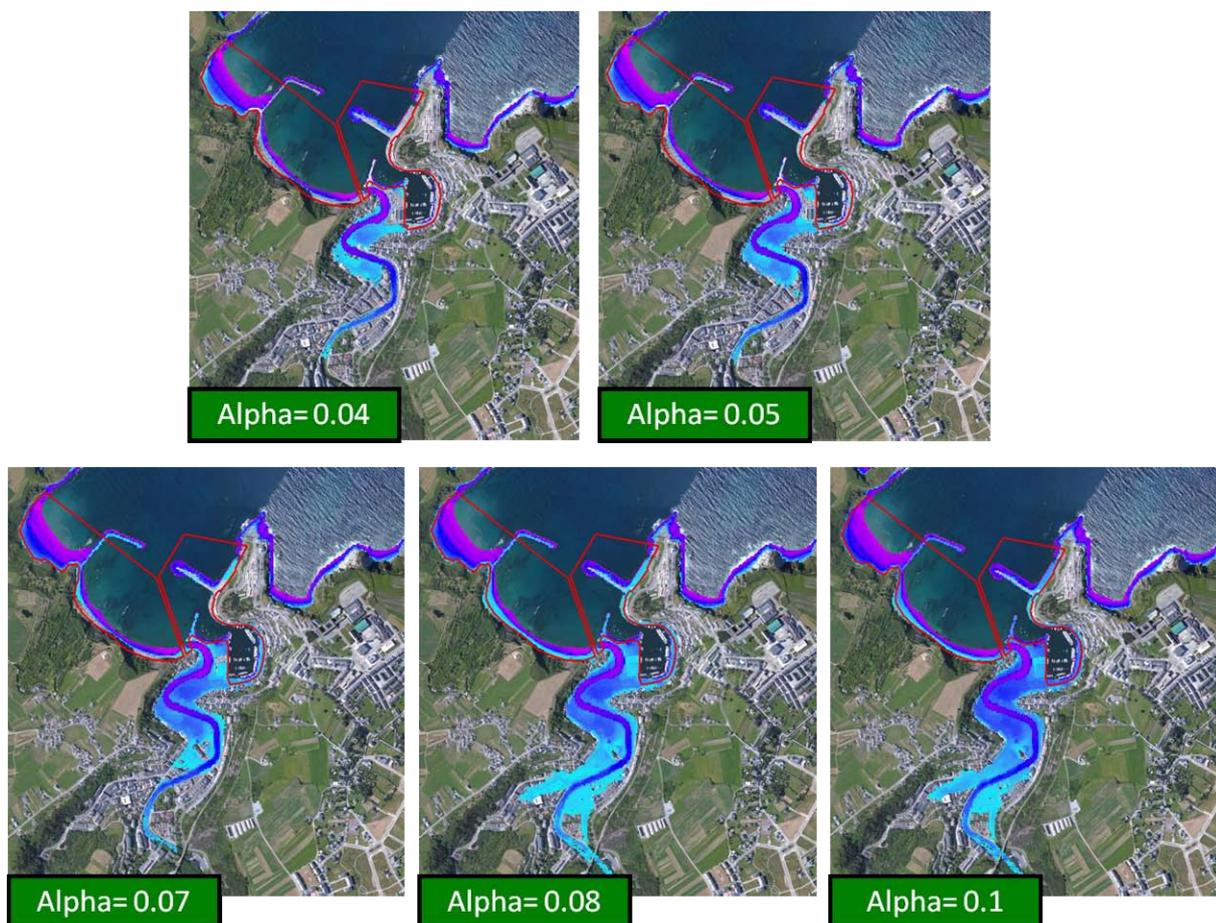


Figura 3.24. Calibración del parámetro α de la formulación de Stockdon et al. (2006) para calcular el set-up del oleaje.

El valor que se ha determinado para el coeficiente α es de 0.04 para playas y de 0.08 para acantilados y puertos.

En el caso de los puertos, sin embargo, el proceso para determinar la contribución del oleaje al TWL ha sido algo más complejo. Conforme el oleaje se aproxima y propaga hacia la costa, éste 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. Cuando el oleaje se encuentra con estructuras de protección costera la difracción hace que éste se vea alterado significativamente. Para capturar este fenómeno, se ha empleado 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 (véase la figura 3.25).

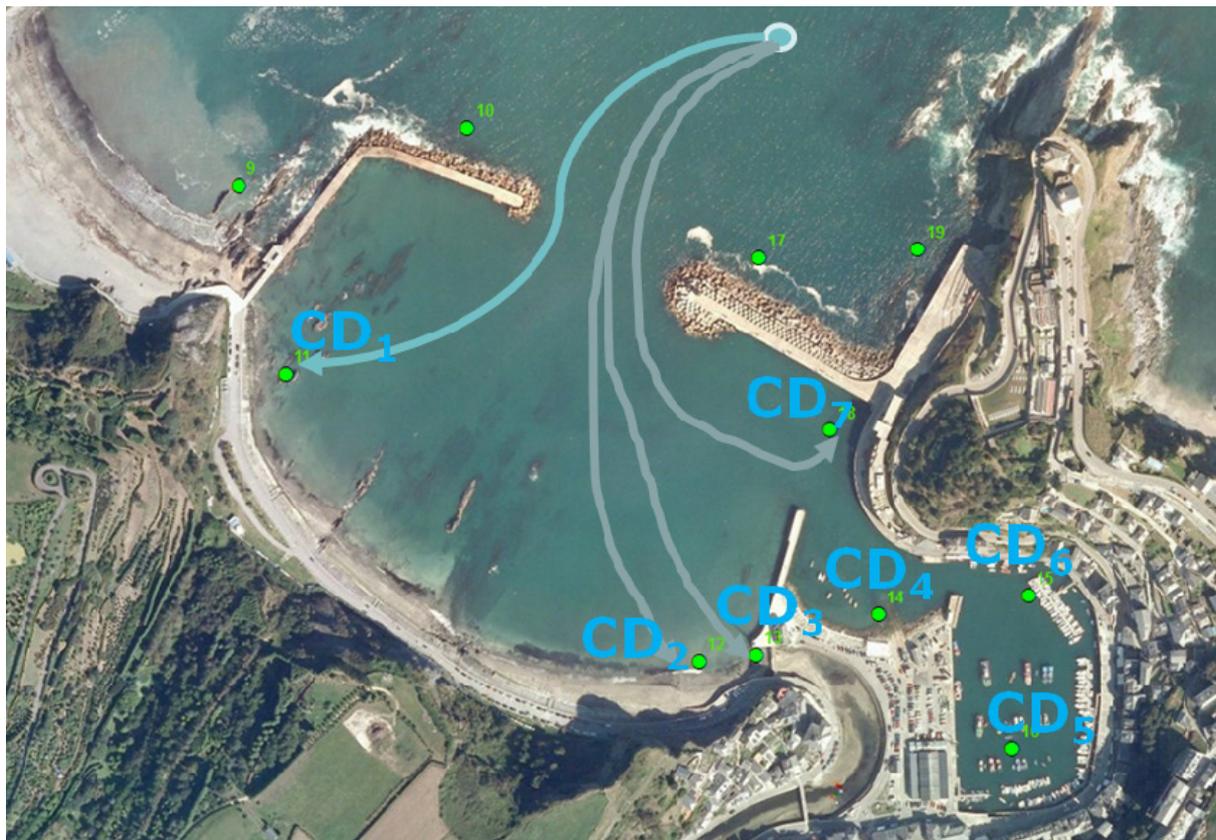


Figura 3.25. Propagación del oleaje de un punto exterior al interior de la dársena principal del Puerto de Luarca.

La figura 3.26 muestra la malla de propagación definida para el Puerto de Luarca. Asumiendo que el oleaje del Noroeste es el que genera las mayores inundaciones, la malla se ha diseñado para un temporal proveniente de esa dirección.



Figura 3.26. Malla de propagación en el Puerto de Luarca

La Figura 3.27 muestra el efecto de la difracción dentro del Puerto de Luarca. Este efecto viene representado por el llamado coeficiente de difracción, que resulta del cociente entre la altura de ola significativa en cualquier punto en el interior del puerto y la altura de ola significativa en la bocana (proporcionado por la base de datos DOW).

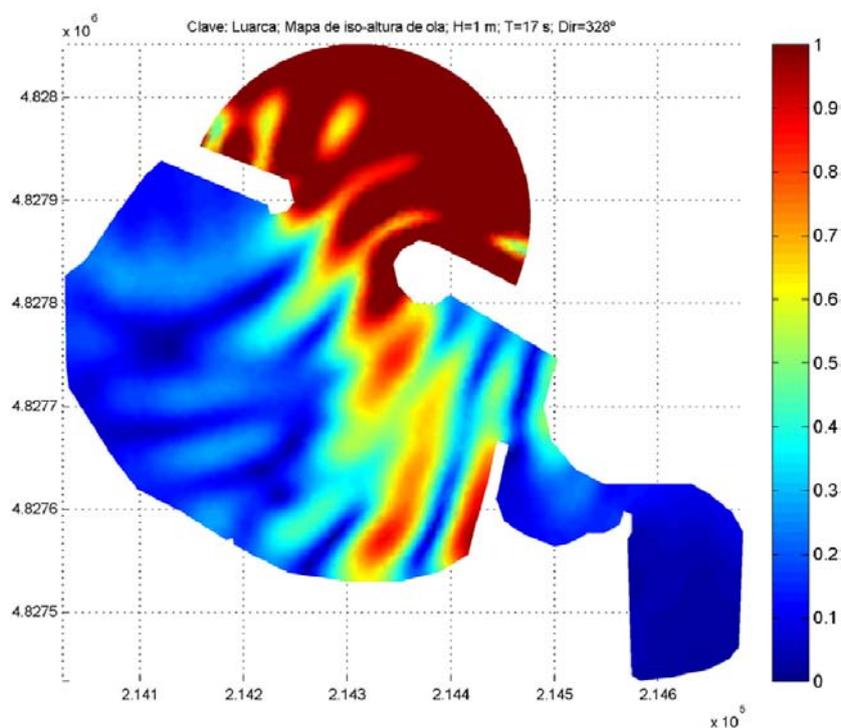


Figura 3.27. Variación de los coeficientes de difracción de la altura de ola dentro del Puerto de Luarca

Una vez obtenidos los coeficientes de difracción mediante el modelo numérico, se han recalculado mediante los ábacos del Shore Protection Manual (SPM).

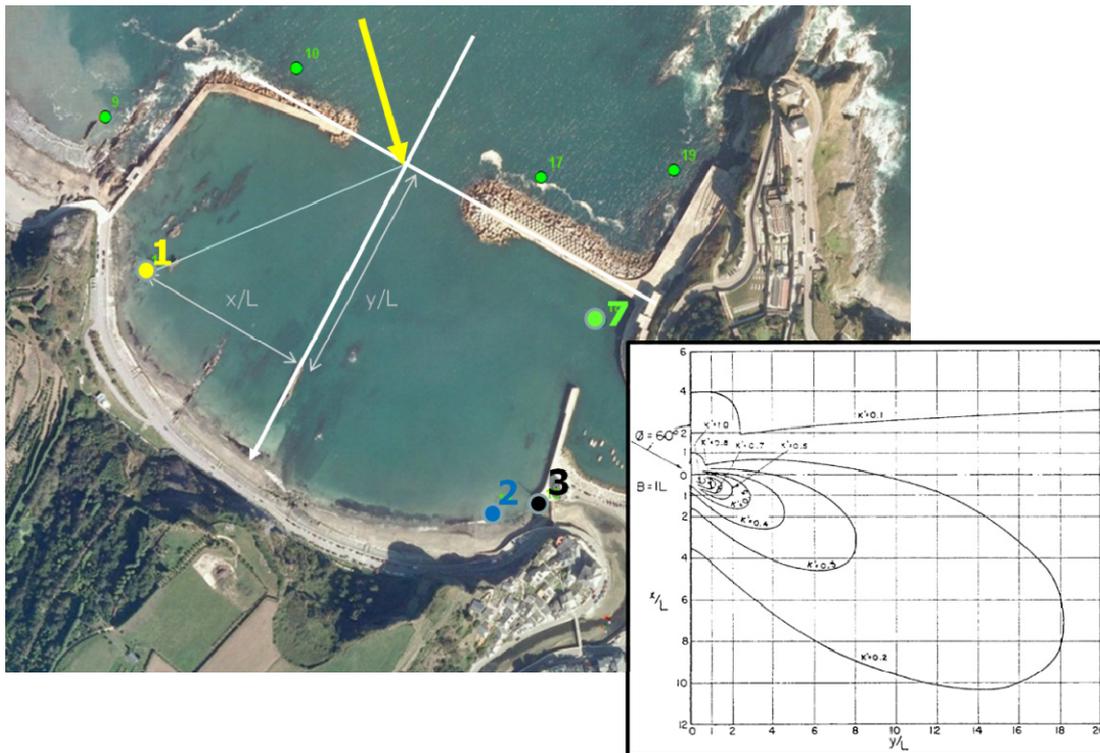


Figura 3.28. Comparación de los resultados del modelo numérico mediante los ábacos del Shore Protection Manual (SPM).

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos para cada los puntos ubicados en la primera dársena del Puerto de Luarca (véase la figura 3.28).

Puntos	SPM	MSP
1	0.12	0.18
2	0.38	0.45
3	0.32	0.48
7	0.26	0.35

Tabla 3.1. Comparación de los coeficientes de difracción obtenidos con el modelo numérico y con los ábacos del SPM.

Los coeficientes de difracción obtenidos con el ábaco del SPM subestiman ligeramente los calculados por el modelo numérico por lo que son algo más conservadores. Asumiendo que las diferencias entre ambos métodos están dentro de un rango aceptable y dado que el objetivo del estudio es el de proponer una metodología general, las alturas de ola difractadas se han determinado mediante la aplicación del SPM en el resto de puertos del Principado de Asturias.

3.5.3. Pruebas de sensibilidad

Se ha realizado un análisis de sensibilidad para analizar la inundación producida por la combinación de dinámicas costeras y continentales: marea astronómica, caudal y precipitación local.

La marea seleccionada corresponde a la Pleamar Viva Equinoccial (PMVE) y se ha utilizado como escenario base para validar el modelo. Respecto al caudal, se ha decidido implementar un caudal medio por no disponer de datos suficientes para discernir una combinación estadística del mismo y las dinámicas costeras. Por otro lado, y a falta de información sobre el régimen de precipitaciones en la zona de estudio, se ha implementado una lluvia torrencial de 100 mm/d durante 6 horas.

La figura 3.29 muestra la comparación de los resultados de la simulación de marea astronómica y de marea astronómica combinada con caudal medio y precipitación local.



Figura 3.29. Análisis de sensibilidad: inundación por MA (panel superior) vs. inundación por MA , caudal medio y lluvia (panel inferior).

Las figuras 3.30 y 3.31 muestran una ampliación de las zonas de Navia y Luarca, respectivamente. Se puede observar cómo el agua de precipitación se acumula en puntos bajos y cómo se producen desbordamientos puntuales de caudal en los cauces de la ría de Navia y del río Negro. Esto puede deberse, por un lado, a que se trata de zonas muy bajas y, por otro, a la falta de resolución del MDT en la definición de los cauces. Por otro lado, no se ha aplicado ninguna tasa de infiltración pues en todo momento se está obteniendo la inundación máxima que podría producirse.

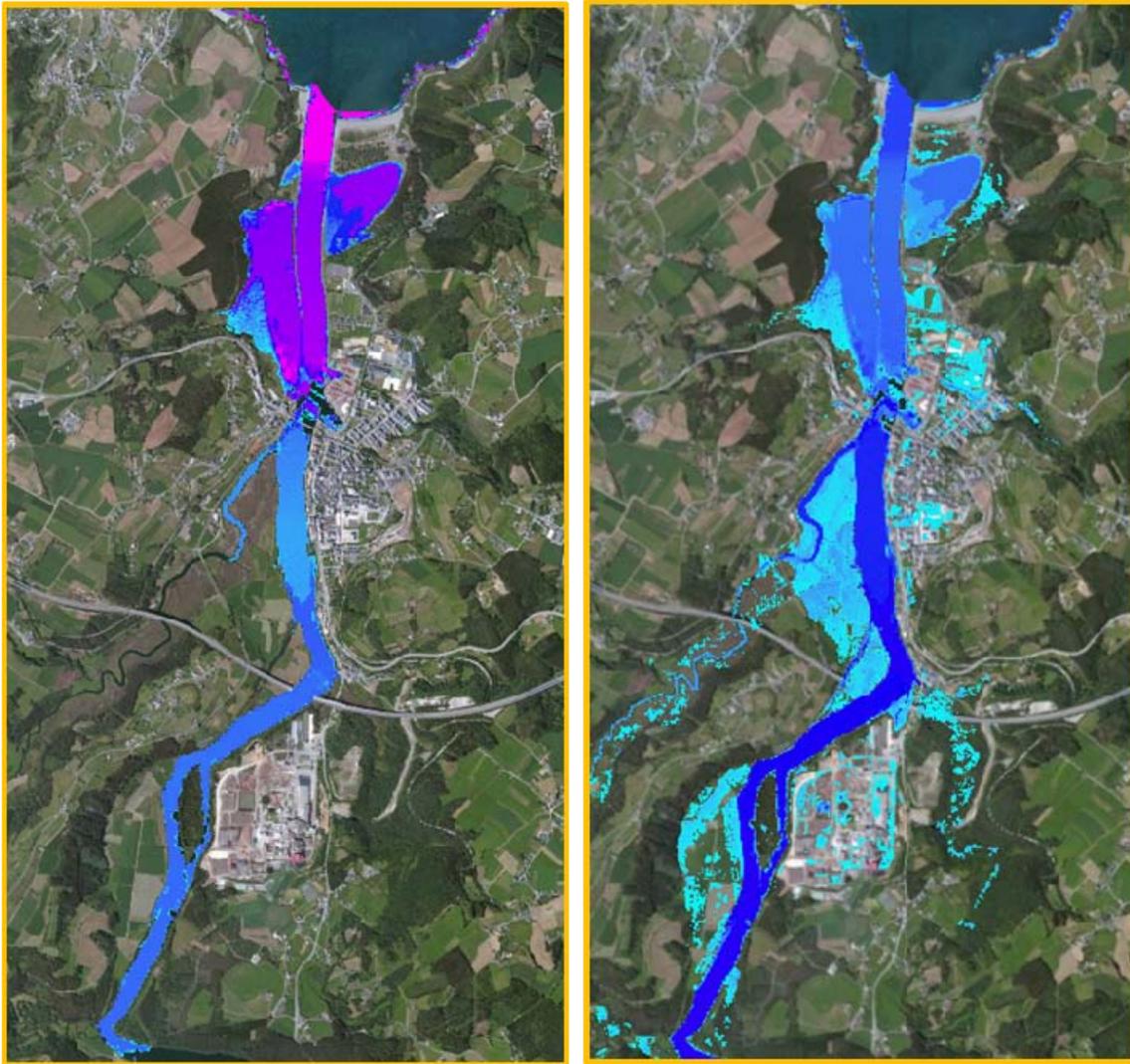


Figura 3.30. Análisis de sensibilidad: Navia



Figura 3.31. Análisis de sensibilidad: Luarca

3.6. Escenarios de cambio climático

Para estudiar adecuadamente el impacto de inundación por cambio climático es necesaria la definición de distintos escenarios asociados a cambios en el clima. Para esta definición, se han analizado las dinámicas marinas mediante dos aproximaciones: el estudio de tendencias históricas basadas en observaciones y las proyecciones para escenarios basados en Rutas Representativas de Concentración (RCP) de gases de efecto invernadero. Los resultados obtenidos para el oleaje y la marea meteorológica no son significativos (véase el informe de la Tarea 2.3), por lo que sólo se han tenido en cuenta las proyecciones de aumento del nivel medio del mar para los escenarios de inundación.

Los horizontes temporales considerados son el clima actual, el año 2050, con el fin de analizar los posibles cambios a medio plazo, y el año 2100, para evaluar las consecuencias a largo plazo. En base a estos horizontes temporales se han planteado 9 escenarios que combinan eventos extremos de 100 y 500 años de periodo de retorno, de acuerdo a la Directiva Europea de Inundaciones, con aumentos del nivel del medio del mar de +0.24 m, +0.45 m (valor medio del RCP4.5 en la costa asturiana modificado localmente con Slangen et al., 2014), +0.65 m (valor medio del RCP8.5 en la costa asturiana modificado localmente con Slangen et al., 2014) y +1 m de subida del nivel del mar, éste último para un escenario más pesimista.

Los escenarios propuestos para estudiar el impacto de inundación por cambio climático en el litoral asturiano son los siguientes:

Escenario 1.- T1 - Clima presente: escenario de inundación del evento extremo de 100 años de periodo de retorno cuyo horizonte temporal es el clima actual.

Escenario 2.- T2 - Clima presente: escenario de inundación del evento extremo de 500 años de periodo de retorno cuyo horizonte temporal es el clima actual.

Escenario 3.- SLR1+T1 - Horizonte 2050: en este escenario se propone una combinación del evento extremo de 100 años de periodo de retorno con una subida del nivel del mar de 0.24 m a 2050.

Escenario 4.- SLR1+T2 - Horizonte 2050: este escenario plantea combinar los efectos del evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m al año horizonte 2050.

Escenario 5.- SLR4 - Horizonte 2100: se trata de un escenario de inundación permanente. Se plantea un incremento del nivel medio del mar de 1 m a 2100, algo pesimista y conservador pero que debe tenerse en consideración.

Escenario 6.- SLR2+T1 - Horizonte 2100: este escenario propone la combinación del evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un incremento del nivel medio del mar de 0.45 m al año horizonte 2100 (valor medio del escenario RCP4.5 del IPCC en la costa asturiana modificado localmente con Slangen et al., 2014).

Escenario 7.- SLR2+T2 - Horizonte 2100: escenario que plantea combinar el evento extremo de 500 años de periodo de retorno con una subida del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio del escenario RCP4.5 del IPCC en la costa asturiana modificado localmente con Slangen et al., 2014).

Escenario 8.- SLR3+T1 - Horizonte 2100: escenario propuesto para evaluar la combinación del evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio del escenario RCP8.5 del IPCC en la costa asturiana modificado localmente con Slangen et al., 2014).

Escenario 9.- SLR3+T2 - Horizonte 2100: se propone un último escenario que combina el evento extremo de 500 años de periodo de retorno con la subida del nivel medio del mar a 2100 (valor medio del escenario RCP8.5 del IPCC en la costa asturiana modificado localmente con Slangen et al., 2014).

A continuación, se muestra una tabla resumen con los escenarios que se plantean en este estudio:

AÑO HORIZONTE	TIPO DE INUNDACIÓN	ESCENARIO	ESCENARIOS CLIMÁTICOS
Actual	EVENTO EXTREMO	EA1	T1
		EA2	T2
2050	EVENTO EXTREMO + I. PERMANENTE	EM1	SLR1+T1
		EM2	SLR1+T2
2100	INUNDACIÓN PERMANENTE	EL1	SLR4
	EVENTO EXTREMO + I. PERMANENTE	EL2	SLR2+T1
		EL3	SLR2+T2
		EL4	SLR3+T1
		EL5	SLR3+T2

Tabla 3.2. Escenarios climáticos propuestos para el estudio del impacto de inundación

Por no disponer de datos suficientes para realizar una combinación estadística adecuada de caudal y TWL, se ha implementado un caudal medio constante en los cauces de las principales rías asturianas obtenido a partir de datos históricos medidos. Como primera aproximación, y dado que las proyecciones de cambio de las precipitación anual acumulada media para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 realizadas por la AEMET muestran cambios inferiores a ± 10 mm, estos caudales medios se han mantenido también en los escenarios futuros.

3.7. Resultados

Para cada escenario se ha considerado el impacto por inundación permanente y por eventos extremos correspondientes a los cuantiles de TWL asociado a 100 y 500 años de periodo de retorno. Los resultados muestran inundaciones características de una costa bastante acantilada donde las zonas bajas de las rías y playas son las que sufren mayor impacto.

En lo que respecta a los resultados en playas urbanas, cabe indicar que, dada su casuística, sería necesario realizar un estudio de detalle muy específico para cada una de ellas y modelar con muy alta resolución la interacción entre el flujo y la estructura. No obstante, y dado que esto queda fuera del alcance de este proyecto, se pretende dar una estimación del impacto al que se verían sometidas en caso de no actuar frente al cambio climático.

A continuación se muestran algunas imágenes de las inundaciones máximas obtenidas tras el modelado. Se han seleccionado los escenarios que mejor representan los cambios para los diferentes horizontes temporales establecidos. Además, se presentan gráficos comparativos de la superficie de área afectada por convejo para cada uno de los escenarios de cambio climático propuestos.

La figura 3.32 muestra la inundación obtenida en Asturias para los escenarios 1, que responde al evento de periodo de retorno de 100 años en el clima actual, 3 y 8 que combinan el evento extremo de 100 años de periodo de retorno con aumentos del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050 y 0.65 m a 2100 (valor medio del escenario RCP8.5 del IPCC en la costa asturiana modificado localmente con Slangen et al., 2014), respectivamente.



Figura 3.32. Inundaciones correspondientes a los escenarios 1 (panel superior), 3 (panel intermedio) y 8 (panel inferior).

Para observar mejor los resultados y poderlos comparar en los distintos escenarios, se muestran, en las siguientes figuras, los detalles de ciertos puntos críticos.

La figura 3.33 muestra una ampliación de la ría de Navia. Se puede observar para los distintos escenarios cómo evoluciona la pérdida de terrenos en zonas bajas fundamentalmente debido a la contribución del aumento del nivel medio del mar. Para periodos de retorno elevados y con un aumento del nivel medio del mar de 66.2 cm (E8 y E9), el agua alcanza ya una parte importante de la ciudad por lo que, si no se actúa al respecto, será necesaria la protección de personas y activos con consecuencias importantes sobre la economía de la región.

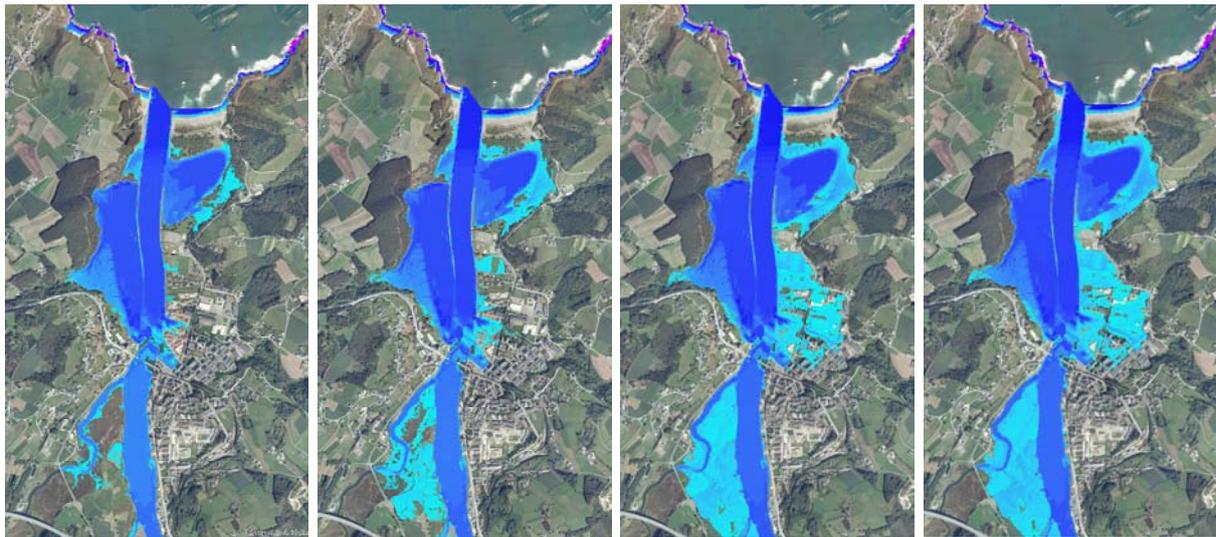


Figura 3.33. Inundación en Navia para los escenarios climáticos 1 (panel izquierdo), 3 (panel en centro-izquierda), 8 (panel en centro-derecha) y 9 (panel derecho).

La figura 3.34 muestra, para los mismos escenarios 1, 3, 8 y 9 los resultados obtenidos en Luarca.



Figura 3.34. Inundación en Luarca para los escenarios climáticos 1 (panel izquierdo), 3 (panel en centro-izquierda), 8 (panel en centro-derecha) y 9 (panel derecho).

A diferencia de lo que ocurre en Navia donde sólo por la subida del nivel medio del mar ya se observan daños significativos, en Luarca (véase la figura 3.34) es la combinación del evento extremo de 100 años de periodo de retorno y el aumento del nivel medio del mar lo que hace que se produzca rebase en las dársenas y el desbordamiento del río

cerca de la desembocadura. En el caso del evento de 500 años de periodo de retorno (E9), las consecuencias se ven claramente intensificadas.

La siguiente figura muestra la inundación en San Esteban de Previa - San Juan de la Arena para los escenarios considerados en los casos anteriores: 1, 3, 8 y 9. Ocurre algo similar al caso de Navia, las zonas bajas empiezan ya a inundarse en el escenario para el evento de 100 años de periodo de retorno en el clima actual. Los incrementos de área afectada se deben esencialmente a la inundación permanente por aumento del nivel medio del mar. Por ello, se puede observar cómo los cambios en las inundaciones correspondientes a los escenarios 8 y 9, que mantienen el mismo aumento de nivel, son inapreciables.

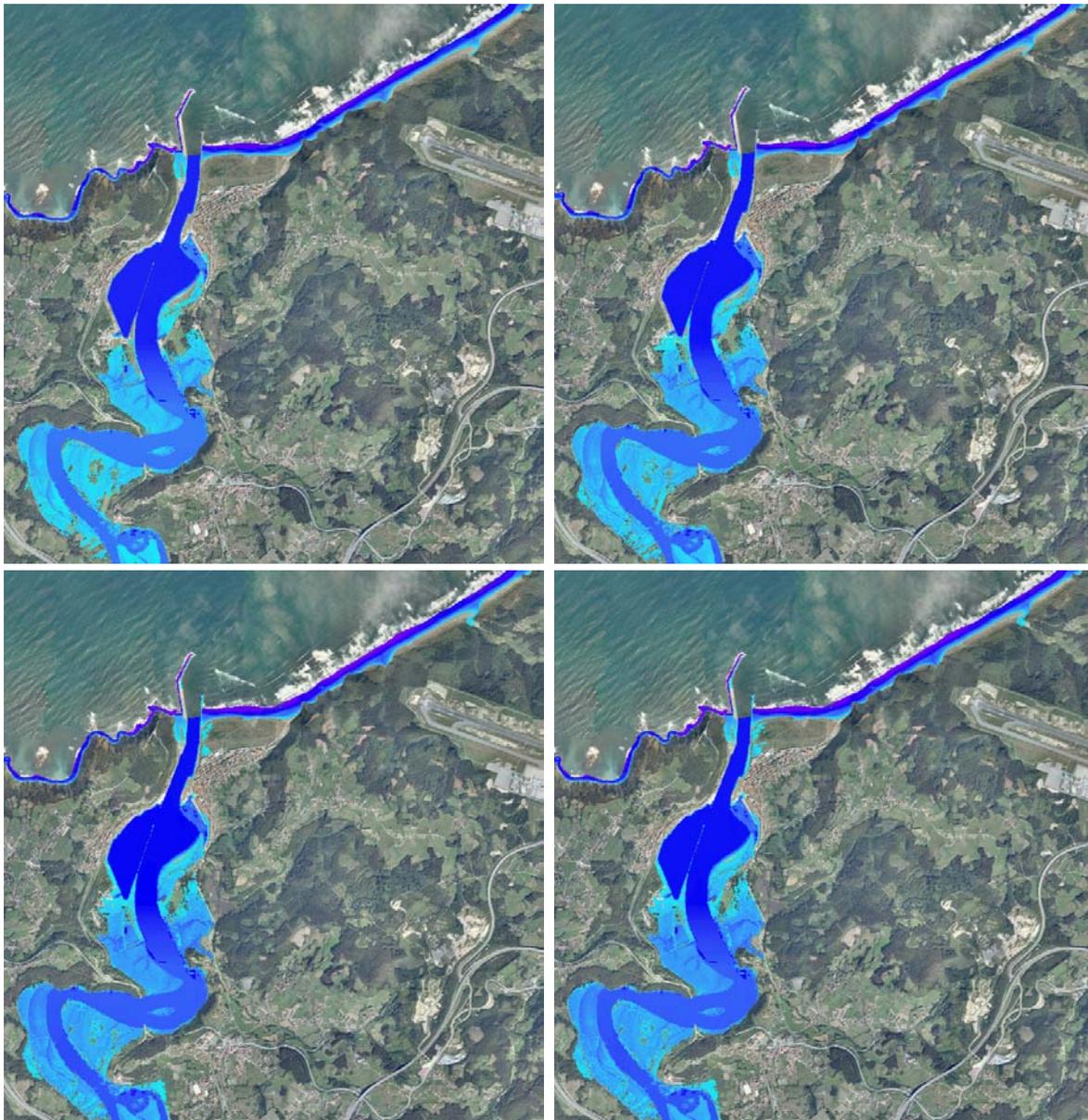


Figura 3.35. Inundación en San Esteban de Previa - San Juan de la Arena para los escenarios climáticos 1 (panel superior izquierdo), 3 (panel superior derecho), 8 (panel inferior izquierdo) y 9 (panel inferior derecho).

La figura 3.36 muestra los resultados obtenidos en Avilés para los escenarios 1, correspondiente al evento del 100 años de periodo de retorno en el clima actual, y los escenarios 8 y 9, que corresponden a la combinación de los eventos de 100 y 500 años de periodo de retorno, respectivamente, con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m (valor medio del RCP8.5 en la costa asturiana modificado localmente con Slangen et al., 2014) a 2100. El MDT inicial no representaba adecuadamente el encauzamiento de la ría, por lo que se ha redefinido con base en las cotas topográficas de las que se ha podido disponer. Asumiendo estas modificaciones, los resultados demuestran que es la combinación de periodos de retorno elevados con aumentos considerables del nivel medio del mar y un caudal medio lo que provocarán el desbordamiento de la ría en caso de no implementar medidas de adaptación. Gran parte de los activos industriales alojados a orillas de la ría, y en consecuencia gran parte de la producción, se verán seriamente afectados.



Figura 3.36. Inundación en Avilés para los escenarios climáticos 1 (panel izquierdo), 8 (panel central) y 9 (panel derecho).

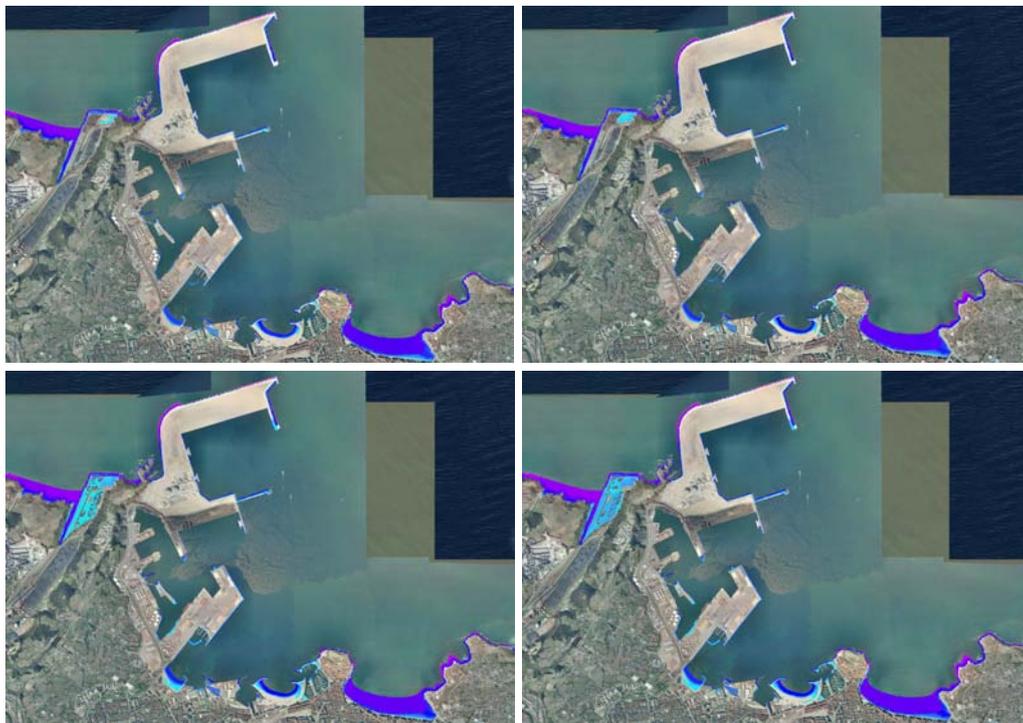


Figura 3.37. Inundación en Gijón para los escenarios climáticos 1 (panel superior izquierdo), 3 (panel superior derecho), 8 (panel inferior izquierdo) y 9 (panel inferior derecho).

El Puerto de Gijón no estará expuesto a inundaciones a excepción del dique de Aboño (véase la figura 3.37), que el caso de combinar periodos de retorno elevados con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m, podrá verse afectado.

Las siguientes figuras muestran el detalle de la inundación en las playas del Arbeyal (véase la figura 3.38) y de Poniente (véase la figura 3.39), en Gijón, para los escenarios 1, correspondiente al evento extremo de 100 años de periodo de retorno, 8 y 9, para eventos de 100 y 500 años de periodo retorno, respectivamente, y aumento de nivel de 0.65 m (valor medio del RCP8.5 en la costa asturiana modificado localmente con Slangen et al., 2014). La altura de la berma, en ambos casos mayor de 3 m, limita el paso del agua en el modelo. Cabe puntualizar, no obstante, que la casuística de las playas urbanas obliga a modelar muy bien la interacción entre el flujo y el paseo marítimo. Para ello es necesario un estudio de detalle muy específico que queda fuera del alcance de este proyecto.



Figura 3.38. Inundación en Arbeyal para los escenarios climáticos 1 (panel izquierdo), 8 (panel central) y 9 (panel derecho).



Figura 3.39. Inundación en Poniente para los escenarios climáticos 1 (panel izquierdo), 8 (panel central) y 9 (panel derecho).

La figura 3.40 muestra la inundación en Villaviciosa para el evento de 100 años de periodo de retorno en el clima actual (escenario 1), donde se puede observar cómo el agua se extiende por las zonas bajas.

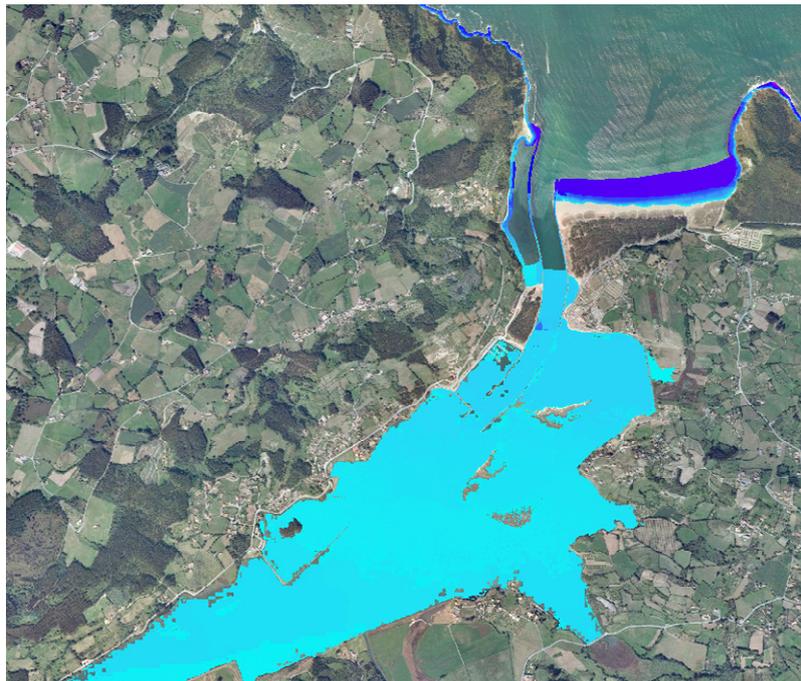


Figura 3.40. Inundación en Villaviciosa para el escenario 1.

A continuación se muestran los resultados de las inundaciones asociadas a los escenarios 1, 3, 8 y 9 en Ribadesella. La inundación se produce principalmente por aumento del nivel medio del mar, con desbordamientos importantes a partir de un incremento de nivel de 0.24 m.



Figura 3.41. Inundación en Ribadesella para los escenarios climáticos 1 (panel izquierdo), 3 (panel en centro-izquierda), 8 (panel en centro-derecha) y 9 (panel derecho).

Las figuras 3.42 y 3.43 describen los resultados del escenario 5 caracterizado por un aumento del nivel medio del mar de 1 m. Se muestran las zonas de Navia, Ribadesella y San Esteban de Pravia - San Juan de la Arena (véase la figura 3.42), donde se puede observar la magnitud de la inundación de zonas bajas de la costa debida al aumento de nivel, y las playas de Barayo, Otur y La Griega (véase la figura 3.43), que perderán parte de su playa seca. Por tratarse de un escenario de inundación permanente, ciertas zonas quedarían anegadas perdiéndose su uso y disfrute.



Figura 3.42. Inundación permanente de 1 m de aumento del nivel medio del mar en Navia (panel izquierdo), Ribadesella (panel central) y San Esteban de Pravia - San Juan de la Arena (panel derecho).



Figura 3.43. Inundación permanente de 1 m de aumento del nivel medio del mar en las playas de Barayo y Otur (panel izquierdo) y en la playa de La Griega (panel derecho).

Una vez obtenidos los mapas de inundación para toda la región, las hectáreas de suelo inundadas se han agregado a nivel municipal. La distribución espacial de los resultados es una herramienta fundamental de planificación territorial ya que permite identificar aquellas unidades administrativas críticas que hay que mirar con más detalle para la implementación de medidas de adaptación concretas. Se puede observar cómo, en hectáreas inundadas, los concejos más afectados son Castropol y Villaviciosa, superando éste último las 680 hectáreas afectadas bajo las hipótesis del escenario 9 (véase la figura 3.52) que responden a un evento de periodo de retorno de 500 años combinado con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m (valor medio del RCP8.5 en la costa

asturiana modificado localmente con Slangen et al., 2014). Por otro lado, los concejos con menos hectáreas inundadas son Caravia, Carreño y El Franco. Se puede apreciar que el escenario con menos superficie afectada es el escenario 5 (véase la figura 3.48), no obstante, se trata de inundación permanente por lo que los terrenos afectados quedarían totalmente anegados y se perderían.

Escenario 1.- CLIMA PRESENTE: Tr=100



Figura 3.44. Área afectada para E1: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el clima actual.

Escenario 2.- CLIMA PRESENTE: Tr=500

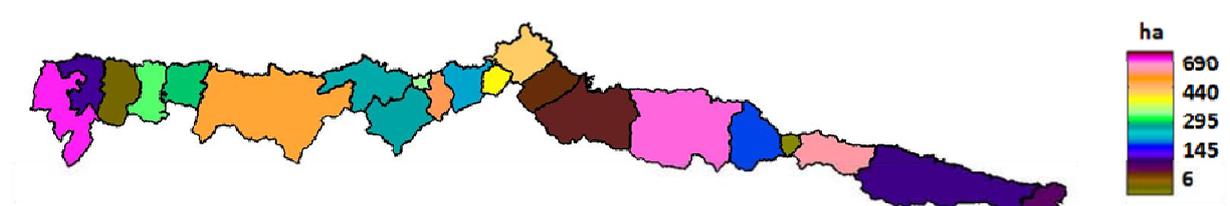


Figura 3.45. Área afectada para E2: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno en el clima actual.

Escenario 3.- HORIZONTE= 2050: Tr=100 + SLR= 0.24 m



Figura 3.46. Área afectada para E3: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050.

Escenario 4.- HORIZONTE= 2050: Tr=500 + SLR= 0.24 m

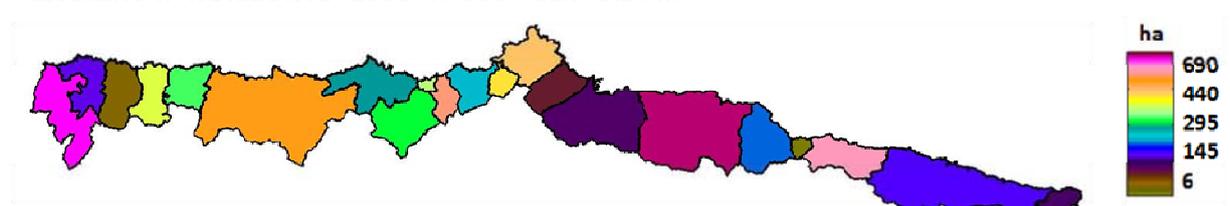


Figura 3.47. Área afectada para E4: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050.

Escenario 5.- HORIZONTE= 2100: SLR= 1 m



Figura 3.48. Área afectada para E5: Inundación permanente por aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100.

Escenario 6.- HORIZONTE= 2100: Tr=100 + SLR= 0.45 m



Figura 3.49. Área afectada para E6: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100.

Escenario 7.- HORIZONTE= 2100: Tr=500 + SLR= 0.45 m



Figura 3.50. Área afectada para E7: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100.

Escenario 8.- HORIZONTE= 2100: Tr=100 + SLR= 0.65 m



Figura 3.51. Área afectada para E8: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100.

Escenario 9.- HORIZONTE= 2100: Tr=500 + SLR= 0.65 m

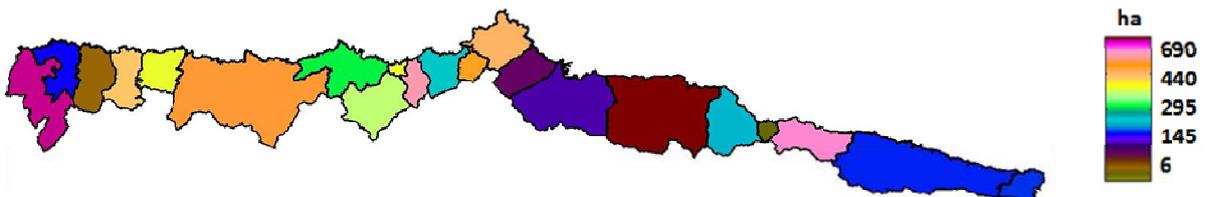


Figura 3.52. Área afectada para E9: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100.

El siguiente gráfico muestra, para cada escenario, el área afectada respecto al área total del Principado de Asturias. Se puede observar la diferencia de área afectada entre los escenarios que combinan aumento del nivel medio del mar con evento extremo, escenarios 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 y 9, y el escenario 5, que sólo tiene en cuenta el aumento de nivel pero que representa inundación permanente. Para éste último escenario se perdería casi el 1,2% del área de Asturias.

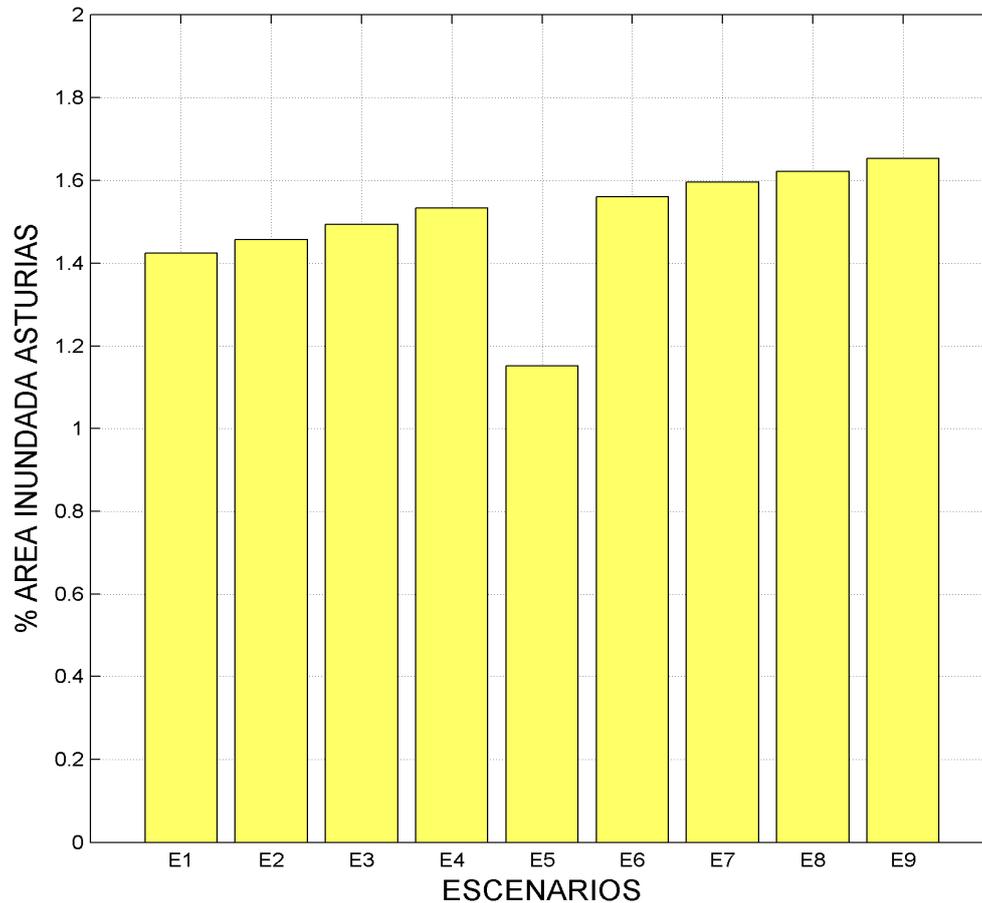


Figura 3.53. Porcentaje de área afectada en cada escenario, respecto al total de Asturias.

La figura 3.54 muestra dos gráficos de barras que comparan el porcentaje de área afectada respecto al total para cada concejo: uno para los escenarios 1, 3, 6 y 8, inundación del evento extremo de 100 años de periodo de retorno para el clima actual, +0.24 m a 2050, +0.45 m (valor medio del RCP4.5 en la costa asturiana modificado localmente con Slangen et al., 2014) a 2100 y +0.65 m (valor medio del RCP8.5 en la costa asturiana modificado localmente con Slangen et al., 2014) a 2100, respectivamente; y otro para escenarios 2, 3, 6 y 8, inundación del evento extremo de 500 años de periodo de retorno para el clima actual, +0.24 m a 2050, +0.45 m (valor medio del RCP4.5 en la costa asturiana modificado localmente con Slangen et al., 2014) a 2100 y +0.65 m (valor medio del RCP8.5 en la costa asturiana modificado localmente con Slangen et al., 2014) a 2100, respectivamente.

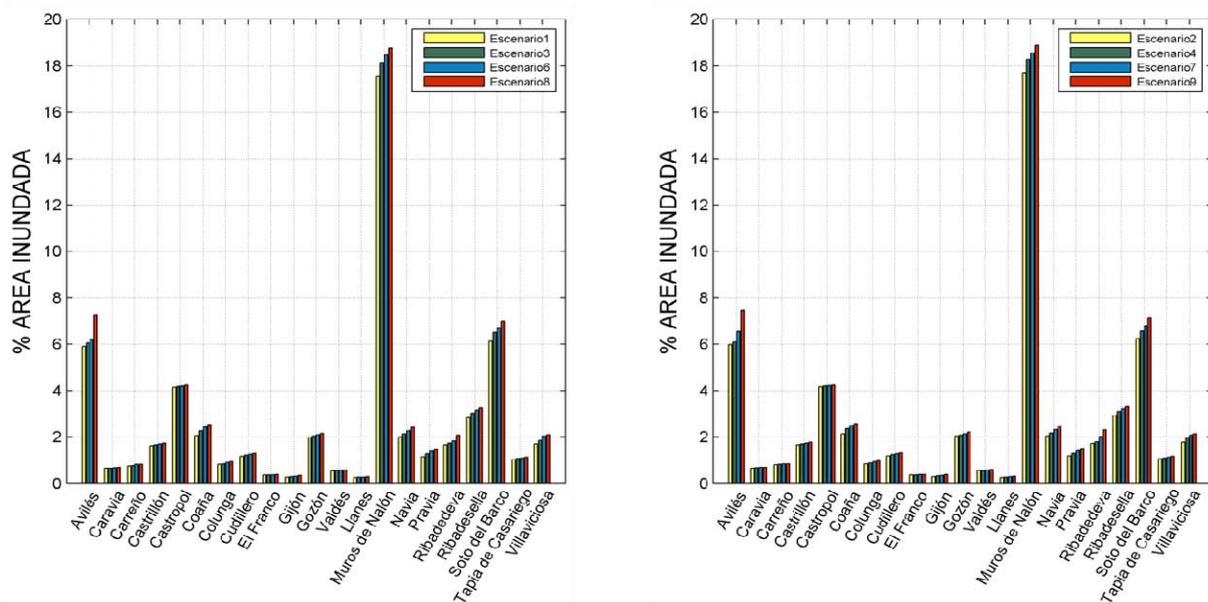


Figura 3.54. Porcentaje de área afectada respecto al total, por concejo: escenarios 1, 3, 6 y 8 (panel izquierdo) y escenarios 2, 3, 6 y 8 (panel derecho)

La diferencia entre el porcentaje de área afectada en los escenarios asociados al cuantil de 100 años de periodo de retorno y los asociados al de 500 años es prácticamente inapreciable a simple vista. El rango de disimilitud oscila entre el 0.004% y el 0.33% en función del escenario y el concejo (véase la figura 3.55). Se puede observar cómo, en el caso de Avilés, la mayor diferencia se produce entre los escenarios 6 y 7, ambos bajo la hipótesis de un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m (valor medio del RCP4.5 en la costa asturiana modificado localmente con Slangen et al., 2014), pues con ese nivel medio el aumento de periodo de retorno propicia el desbordamiento de la ría por la margen izquierda.

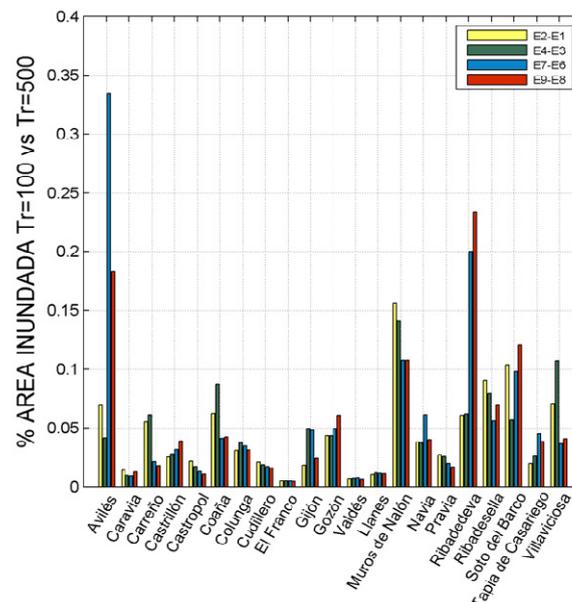


Figura 3.55. Diferencia en el porcentaje de área afectada para los escenarios asociados al cuantil de 100 y 500 años de periodo de retorno.

4. EROSIÓN

4.1. Introducción

Uno de los impactos potenciales de cambio climático en la costa es la aceleración de la erosión de playas que, por su complejidad y dinamismo, experimentan cambios en una variedad de escalas temporales y espaciales y su forma no es fija a lo largo del tiempo sino que está en continuo cambio. La erosión es un proceso morfodinámico producido por la pérdida de sedimento que depende, fundamentalmente, de cambios en el nivel medio del mar, en la dirección del oleaje y en el transporte de sedimentos.

En condiciones de equilibrio, la forma en planta de una playa está gobernada por el balance en el transporte sedimentario originado por el oleaje, y el perfil está, generalmente, relacionado con el oleaje de la zona, la batimetría y el tamaño del grano. La subida del nivel del mar propiciará cambios en la línea de costa, lo que dará lugar a cambios en el clima marítimo y en el transporte de sedimentos. Como consecuencia, el perfil de playa se verá modificado a través de cambios en el transporte transversal desde el nuevo nivel alcanzado hasta la profundidad de cierre de dicho perfil.

Este estudio se centra en el análisis de la respuesta que pueden presentar las diferentes playas del litoral asturiano frente al aumento del nivel medio del mar y a las variaciones del mismo debidas a las dinámicas costeras. Para lograr este objetivo, se ha seleccionado una serie de playas de la costa asturiana y, utilizando características propias de cada una de ellas y para cada uno de los escenarios propuestos, se ha obtenido el retroceso medio de cada perfil. Por otro lado, y asumiendo que las dinámicas de oleaje y marea meteorológica no cambian, se ha analizado el régimen histórico de erosión/acreción y, posteriormente, se ha estudiado el efecto que tendría la inclusión del aumento del nivel del mar, obteniendo para cada caso el retroceso medio y otros estadísticos relevantes.

4.2. Dinámicas generadoras de la erosión

La acción conjunta de los distintos procesos de la dinámica marina sobre los sedimentos de una playa da lugar al transporte de arena y, consecuentemente, a una variación del fondo. El estudio de este conjunto de acciones y respuestas, conocido como procesos litorales, debe realizarse de un modo aproximado dada su complejidad. Los procedimientos existentes se basan principalmente en dos aproximaciones: la primera se refiere a la tridimensionalidad de los procesos litorales y admite que el estudio de los mismos puede efectuarse analizando por separado los procesos transversales (perfil) y los procesos longitudinales (planta); la segunda, es relativa a la escala temporal y a la necesidad de utilizar formulaciones específicas en función de la escala de interés.

Este estudio se ha centrado en análisis de los procesos litorales transversales asumiendo que son aquellos que rigen las variaciones estacionales e interanuales de la mayoría de playas de la costa del Principado de Asturias.

La caracterización de la erosión se ha llevado a cabo, por un lado, asociada a cambios a corto plazo, donde la peligrosidad queda definida a través del oleaje, la marea meteorológica y la marea astronómica. Estudios empíricos han demostrado que la mayoría de cambios significativos en la línea de costa ocurren como respuesta a incrementos en el nivel del mar local, debidos a la marea meteorológica y al set-up del oleaje en combinación con ondas largas.

Por otro lado, se ha efectuado un estudio a largo plazo, es decir, se ha analizado el retroceso del perfil de playa que experimentarán las playas como respuesta al aumento del nivel medio del mar inducido por el cambio climático. Un aumento en el nivel medio generará un incremento en la profundidad de agua en cualquier punto del perfil de la playa. En estas condiciones, el perfil dejará de estar "en equilibrio" y sufrirá un ascenso de igual magnitud que el experimentado por el nivel del mar para reajustarse y acomodarse así al nuevo nivel. Asumiendo la hipótesis de playa bidimensional, este ascenso del perfil se producirá con la arena del propio perfil, lo que propiciará un retroceso del mismo con el objetivo de cubrir el déficit de sedimento en el sistema.

4.3. Exposición

El estudio de la erosión de playas es un problema complicado y específico de cada playa. Entre otros factores, influyen las características físicas del sedimento, las condiciones locales del oleaje y la batimetría, la orientación y la configuración de la costa.

Con el fin de caracterizar la erosión en la costa de Asturias, se han escogido 57 playas del Principado (véase la figura 4.1.) de acuerdo a los siguientes criterios:

- ✓ Longitud: igual o mayor a 200 metros
- ✓ Tipología de sedimento: arena
- ✓ Hipótesis: todas las playas son encajadas



Figura 4.1. Selección de playas de la costa del Principado de Asturias.

Una vez realizada la selección de las playas objeto de estudio, se ha procedido a recabar toda la información necesaria de cada una de ellas.

En primer lugar, y dado que parte de la formulación que se va a utilizar es función de las condiciones del oleaje en rotura, se ha determinado la orientación media de la batimetría así como a la profundidad a la que se encuentra el oleaje de partida en cada una de las playas. Con estos datos se ha propagado y se ha obtenido la profundidad y altura de ola en el instante de rotura.

Para cada unidad de estudio se ha determinado la carrera de marea (CM) que responde a la diferencia de nivel entre la pleamar viva equinocial (PMVE) y la bajamar viva equinocial (BMVE).

La anchura media se ha tomado de cartografía descargable de la "Guía de playas de España" del MAGRAMA.

Un parámetro importante en la forma del perfil es la profundidad de cierre (h^*), límite a partir del cual el oleaje deja de influir en la forma del perfil. El valor medio anual de la profundidad de cierre, relacionada con la zona activa de transporte sedimentario, depende de la altura de ola que es superada 12 horas al año (H_{s12}), de la sucesión de los temporales y de la persistencia de los mismos. En la figura 4.2. se muestra la distribución espacial de la H_{s12} de cada una de las playas de estudio a lo largo del litoral asturiano.

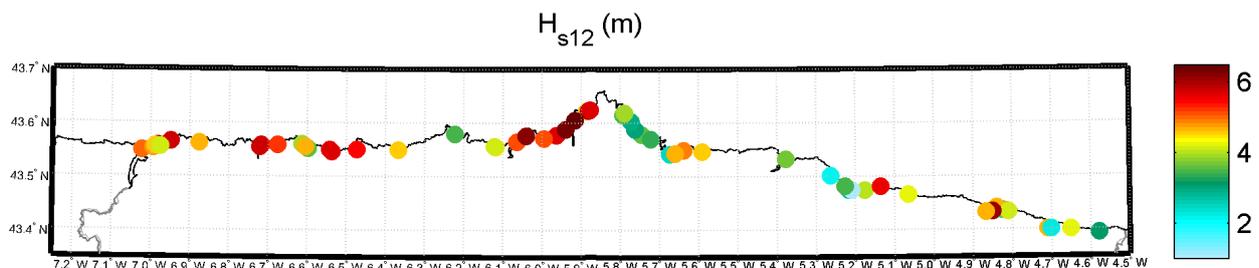


Figura 4.2. Distribución espacial de la altura de ola que es superada 12 horas al año (H_{s12}).

Otro parámetro físico relevante es el tamaño representativo del sedimento (D_{50}). En base a estudios realizados, para arenas de playas en el Cantábrico, se puede considerar como cota inferior y superior 0.23 y 0.28 mm, respectivamente. A falta de información, se ha asumido un tamaño medio homogéneo de sedimento para todas las playas de 0.26 mm.

También a falta de datos de campo, se ha medido la altura de la berma de cada playa a partir del Modelo Digital de Terreno basado en datos LiDAR de 5 metros de resolución horizontal del que se dispone.

4.4. Modelado de la erosión

La predicción de la migración de la línea de costa puede simplificarse separando los cambios debidos a procesos longitudinales, mayormente responsables de los cambios a largo plazo, de los ocasionados por procesos transversales, estos últimos tendientes a producir cambios en escalas temporales mucho menores. Sin embargo, y como excepción a la anterior 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 del mismo.

En este estudio, se ha decidido aplicar modelos de equilibrio basados en el perfil transversal de playa para reproducir la evolución estacional y decadal de la línea de costa, considerando que los procesos transversales son aquellos que gobiernan las variaciones estacionales e interanuales de la mayoría de los sistemas morfodinámicos del litoral asturiano (la mayor parte de ellos son sistemas semicerrados).

Numerosos modelos fundamentados en la física de dichos procesos transversales han sido desarrollados y validados, la mayor parte centrados en reproducir la respuesta de un determinado perfil de equilibrio tipo, ante el efecto del oleaje (Davidson and Turner, 2009; Yates et al., 2009, 2011; Davidson et al., 2010, 2013; Jara et al. 2015). En este estudio se ha implementado el modelo propuesto por Miller y Dean (2004), que además de incorporar los procesos relacionados con el clima de oleaje, incluye el efecto de la marea meteorológica y marea astronómica. Además, este modelo ha sido ligeramente modificado para ser utilizado en playas macromareales.

De forma paralela, se ha aplicado la 'Regla de Bruun' (Bruun, 1954, 1962, 1983), para explicar el retroceso debido al aumento del nivel del mar para diferentes escenarios climáticos.

Finalmente los efectos asociados a procesos de corto plazo (olas, marea meteorológica y astronómica) se han agregado a los efectos del aumento del nivel del mar con lo que se han obtenido resultados de máximos retrocesos en el periodo de estudio.

4.4.1. Erosión debida al aumento del nivel del mar: Bruun

La 'Regla de Bruun' (Bruun, 1954, 1962, 1983) ha sido ampliamente utilizada por la ingeniería de costas como el único predictor del retroceso de la línea de costa frente al aumento del nivel del mar, y frecuentemente esta variable ha sido vinculada con el cambio climático, tratando de explicar sus efectos sobre el litoral. Esta se basa en la suposición de que el perfil conserva su forma promedio en relación al nivel del mar. Por ello, la forma del perfil contiene toda la información necesaria para predecir la respuesta a una sobreelevación por aumento del nivel. Para mantener la forma del perfil, la parte superior se erosiona y la parte más baja se incrementa, trasladando el litoral hacia la tierra (véase la figura 4.3.).

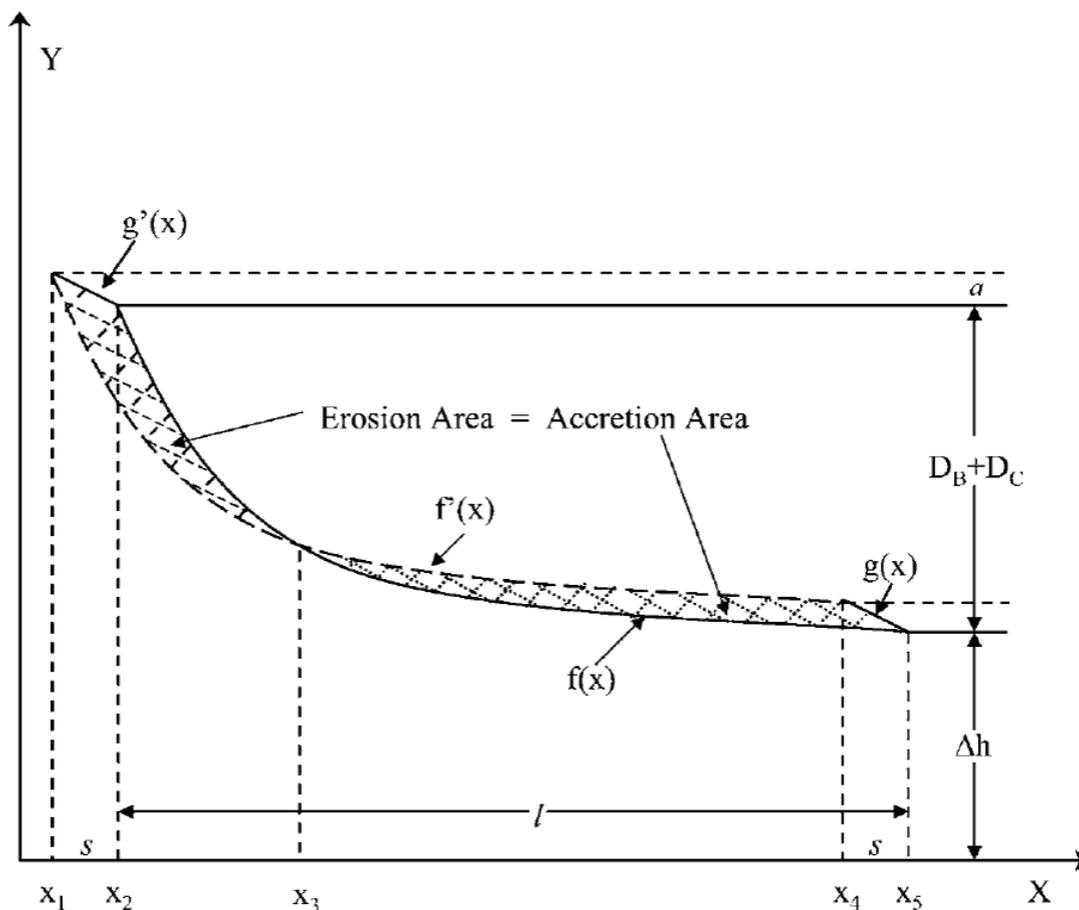


Figura 4.3. Geometría de la zona activa de perfil de playa para la derivación de la regla de Bruun.

El modelo bidimensional propuesto por Bruun (1954, 1962, 1983), se basa en las siguientes hipótesis:

- El perfil de playa activo perpendicular a la línea de costa tiende a una forma de equilibrio, y se extiende hasta la llamada profundidad de cierre. La profundidad de cierre es aquella profundidad a partir de la cual las olas apenas producen transporte de sedimento.
- Si el resto de condiciones permanecen invariantes en el tiempo, y el nivel del mar aumenta, el perfil de playa activo alcanzará una nueva posición de equilibrio retrocediendo hacia tierra. Este efecto es la resultante de una erosión en la parte superior del perfil y una acreción sobre la parte inferior.
- El volumen de sedimento erosionado es igual al volumen de sedimento depositado, por lo que no existe intercambio de sedimento fuera de la profundidad de cierre.
- El incremento en la elevación del fondo es igual a la sobreelevación del nivel del mar.

Dadas estas condiciones, la formula que explica el movimiento debido a una sobreelevación por aumento en el nivel del mar, se puede deducir de la Figura 4.3, y es mostrada en la ecuación 4.1.

$$s(D_B + D_C) = al \quad \text{or} \quad a = \frac{(D_B + D_C)}{l} s \quad (4.1)$$

Donde s es el retroceso de la línea de costa, D_B es la elevación de la playa sobre el nivel medio (la altura de berma), D_C es la profundidad de cierre, a es la sobreelevación por aumento del nivel mar, y l es la longitud efectiva de perfil (desde el frente de playa hasta la profundidad de cierre).

En este estudio la profundidad de cierre se ha calculado con Birkemeier (1985).

Utilizando datos de medidas de perfiles de playa, Birkemeier (1985) obtuvo una expresión para la profundidad de cierre, h^* , definida según la ecuación 4.2,

$$h^* = 1.75H_{s12} - 57.9 \left(\frac{H_{s12}^2}{gT_s^2} \right) \quad (4.2)$$

donde H_{s12} es la altura de ola significativa que es excedida doce horas al año y T_s es el periodo de pico asociado a esa altura de ola significativa.

El nivel del mar no cambia la forma del perfil, sólo crea un potencial para la erosión que la disponibilidad de energía de las olas realizan. Por lo tanto se espera que el ajuste del perfil a los niveles del mar más altos tome mayor tiempo.

4.4.2. Erosión debida a oleaje y niveles: Miller y Dean

Miller y Dean (2004) resolvieron numéricamente la forma integral del modelo 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 marea astronómica, marea meteorológica y set-up provocado por el oleaje. Este es un modelo de evolución de la línea de costa que reúne las siguientes características:

- Aplicable al medio plazo
- Tendente a una posición de equilibrio
- Con capacidad para reproducir los movimientos de la línea de costa debidos a procesos transversales a lo largo del perfil de playa.

El modelo de Miller y Dean (2004), MD2004, se basa en un perfil de equilibrio de Dean (Dean, 1991) y se fundamenta en la conservación de volumen de sedimento ante un movimiento en dicho perfil propuesta por Bruun (Bruun, 1954, 1962, 1983).

La Figura 4.4 muestra la respuesta del perfil por un incremento en el nivel del mar debido a una combinación de marea meteorológica (S) y el setup inducido por el oleaje (η).

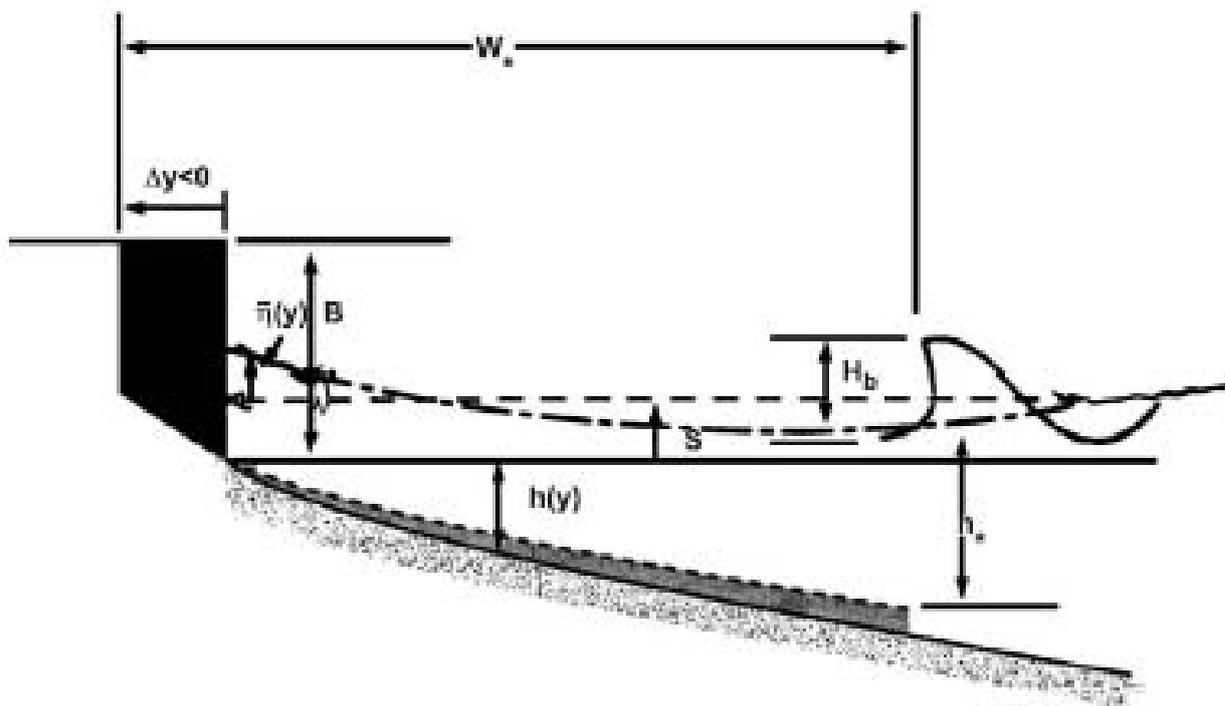


Figura 4.4. Cambio en la línea de costa resultante de un incremento en el nivel del mar, por una combinación de marea meteorológica y setup inducido por el oleaje.

El modelo MD2004 resuelve la siguiente ley cinética de primer orden,

$$\frac{dy(t)}{dt} = k(y_{eq}(t) - y(t)) \quad (4.3)$$

Donde y_{eq} es aquella posición que se alcanzaría si los forzamientos permaneciesen indefinidamente en el tiempo.

Para evitar los problemas y limitaciones de la solución analítica propuesta por Kriebel y Dean (1993) a través de una integral de convolución, Miller y Dean (2004) proponen una solución numérica a través de un esquema en diferencias finitas, aplicando el método de Crank-Nicholson. Éste es un método de segundo orden en tiempo, semi-implícito e incondicionalmente estable. La solución propuesta ofrece una precisión de orden $O(n^2)$.

$$y^{n+1} = \frac{y^n + A[(y_{eq}^{n+1} + y_{eq}^n) - y^n]}{1 + A}, \quad A = \frac{k\Delta t}{2} \quad (4.4)$$

La posición de equilibrio y_{eq} en un instante ' t ', aquella que se alcanzaría si los forzamientos en el instante ' t ' permaneciesen indefinidamente, es definida a través de la siguiente ecuación,

$$y_{eq}(t) = \Delta y_0 + \Delta y_{eq}(t) \quad (4.5)$$

Donde Δy_0 es una constante empírica a determinar, y Δy_{eq} explica la evolución de la línea de costa desde una posición base. Δy_{eq} , se calcula de forma análoga al retroceso explicado mediante la Regla de Bruun.

$$\Delta y_{eq}(t) = -W^*(t) \left(\frac{0.106H_b(t) + S(t) + T(t)}{B + h_b(t) + CM} \right) \quad (4.6)$$

Dónde W^* , hace referencia a la anchura de perfil activa, y se calcula con la profundidad de rotura del oleaje h_b ,

$$W^* = (h_b / A)^{3/2} \quad (4.7)$$

A es el parámetro de Dean (Dean, 1991). En el numerador de la ecuación 4.6 aparecen los términos relativos a la sobre elevación del nivel del mar, donde H_b es la altura de ola en rotura, S es la marea meteorológica y T es el nivel de marea astronómica en el instante ' t '. Y en el denominador la profundidad activa de perfil, donde B es la altura de berma, h_b la profundidad de rotura, y CM es la carrera de marea.

En la ecuación 4.3 la variable k es una constante que determina la velocidad a la que el perfil alcanza el equilibrio. En la aplicación del MD2004 al litoral asturiano se han tomado dos valores en cada playa diferenciando acreción y erosión. Para determinar el valor de estas constantes y reducir el grado de incertidumbre es necesario disponer de medidas de campo u observaciones con alta resolución.

Por lo tanto, para poder aplicar este modelo, es necesario realizar una serie de hipótesis sobre las características de las playas:

- Es posible separar los procesos longitudinales de los transversales, y estudiar la evolución de la línea de costa mediante el estudio de sus variaciones en perfil.

- El tamaño de grano del sedimento en la playa es homogéneo y se caracteriza por su D_{50}
- El perfil de playa se ajusta bien a un perfil de Dean tipo, caracterizado por su D_{50} .
- Existe berma y su altura es constante, tomando un valor B.
- No existen pérdidas de sedimento en el tiempo en los procesos de acreción y erosión.

4.5. Escenarios de cambio climático

El estudio del impacto de erosión por cambio climático requiere de la definición de distintos escenarios asociados a cambios en el nivel medio del mar, dos de ellos basados en los últimos valores de aumento de nivel medio del mar global que el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC 2014) publicó en su último informe (AR5).

Los escenarios climáticos propuestos para estudiar el impacto de erosión en el litoral asturiano son los siguientes:

Escenario SLR1 - subida del NMMR de 24 cm a 2050: este escenario tiene en cuenta una subida del nivel del mar de 24 cm a medio plazo, para el año horizonte 2015.

Escenario SLR2 - subida del NMMR de 45 cm a 2100: en este escenario se propone una subida del nivel del mar de 45 cm que corresponde al escenario RCP4.5 del IPCC regionalizado en Asturias. Se trata de un aumento del nivel medio del mar a largo plazo, para el año horizonte 2100.

Escenario SLR3 - subida del NMMR de 65 cm a 2100: este escenario contempla una subida del nivel del mar de 65 cm que corresponde al escenario RCP8.5 del IPCC regionalizado en Asturias. Se propone un aumento del nivel medio del mar a largo plazo, para el año horizonte 2100.

Escenario SLR4 - subida del NMMR de 1 m a 2100: análogamente a los escenarios anteriores, en este escenario se contempla un cambio en el nivel medio del mar. En este caso, se propone una subida del nivel del mar de 1 m a 2100, un escenario más pesimista y conservador basado en modelos semi-empíricos que debe tenerse en consideración.

A continuación, se muestra una tabla resumen de los escenarios de aumento del nivel del mar considerados:

AÑO HORIZONTE	INUNDACIÓN PERMANENTE, SLR (m)		
	RCP4.5	RCP8.5	High++
2050	SLR1=0.24		-
2100	SLR2=0.45	SLR3=0.65	SLR4=1

Tabla 4.1. Escenarios climáticos propuestos para el estudio del impacto de erosión

4.6. Resultados

A lo largo de este apartado se van a describir los resultados obtenidos tras realizar el análisis de la erosión en la costa del Principado de Asturias. En primer lugar se va a presentar la reconstrucción de las series temporales de erosión-acreción obtenidas con el modelo de Miller y Dean (2004), la variabilidad interanual de la erosión acumulada en invierno y mapas espaciales del retroceso medio y extremal para las playas objeto de estudio. A continuación, se van a describir la distribución espacial de los retrocesos por aumento del nivel del mar obtenidos con el modelo de Bruun (1983) y los volúmenes de sedimento potencialmente perdido. Finalmente, se van a mostrar los resultados obtenidos con distintas aproximaciones para agregar los efectos asociados al corto plazo al aumento del nivel del mar.

Cabe recalcar que los resultados que se muestran a continuación son muy conservadores pues, a falta de datos de campo, ha necesario asumir ciertas hipótesis simplificadoras como suponer todas las playas encajadas, el tamaño del grano homogéneo en cada una de ellas, la altura de berma constante y la conservación del sedimento en el sistema. Por otro lado, y especialmente tras los últimos temporales marítimos, la anchura media de playa empleada está sobreestimada. Por ello, para analizar cada playa en detalle sería necesario un estudio específico con campañas batimétricas que queda fuera del alcance de este trabajo. No obstante, los datos obtenidos muestran la variabilidad de las playas asturianas.

4.6.1. Reconstrucción de las series temporales de erosión-acreción

La implementación del modelo de Miller y Dean (2004) ha permitido la reconstrucción de la serie temporal de erosión-acreción de la línea de costa en cada una de las playas de estudio (véanse las figuras 4.5, 4.6 y 4.7) durante el periodo 1947-2014. Como se ha apuntado en el apartado 4.4.2, una de las principales limitaciones es la necesidad de medidas de campo u observaciones para calibrar algunos parámetros del modelo. Para determinar el valor de las constantes de erosión y acreción, a falta de información, se ha recurrido a datos de campo de estudios realizados por IHCantabria en otras playas del Cantábrico así como a las conclusiones extraídas del informe de la Tarea 1.2. tras el análisis de imágenes LANDSAT. De esto último se extrajo que los cambios en la línea de costa en las fechas de las que se dispone imágenes no son significativos y, dado que el tamaño del píxel es de 30 metros, se ha asumido que estos, como mucho, estarán el el entorno de los 20 metros.

A continuación, se muestran las series temporales obtenidas en las playas de Navia, Salinas y San Lorenzo así como una ampliación del periodo de enero a junio de 2014 con el objetivo de analizar los temporales que se produjeron durante ese invierno. La línea verde indica el ancho medio de playa tomado de la "Guía de playas de España" del MAGRAMA.

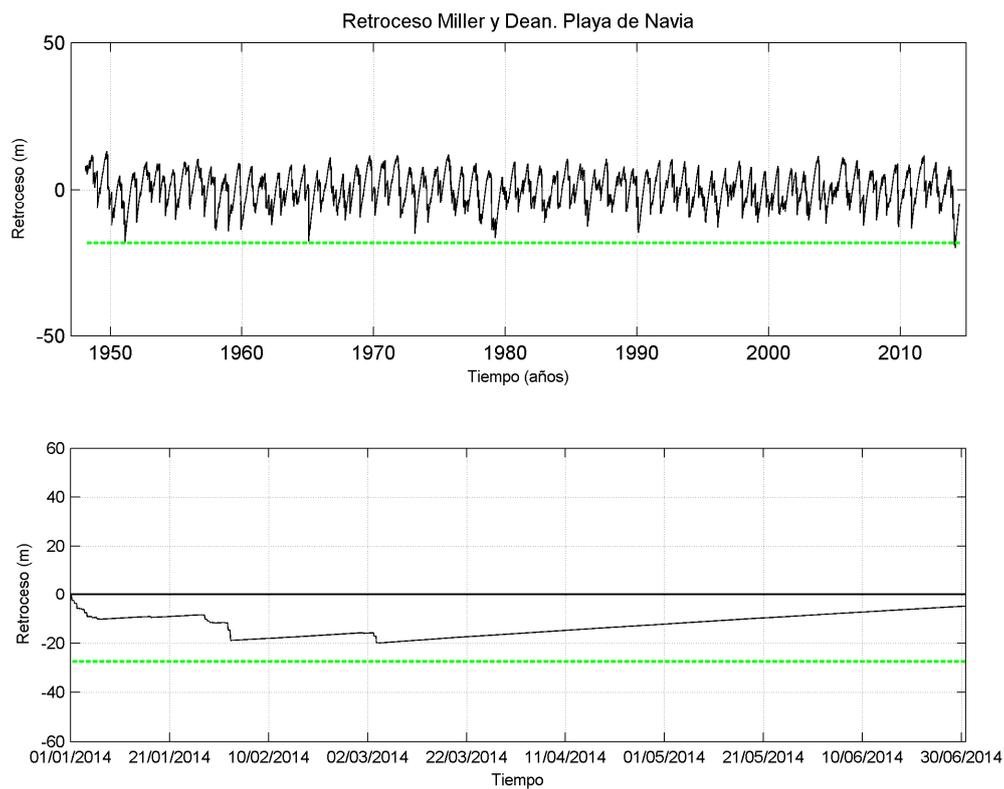


Figura 4.5. Serie temporal de erosión-acreción de la playa de Navia obtenida con Miller y Dean (panel superior). Zoom de la serie de enero-junio de 2014 (panel inferior).

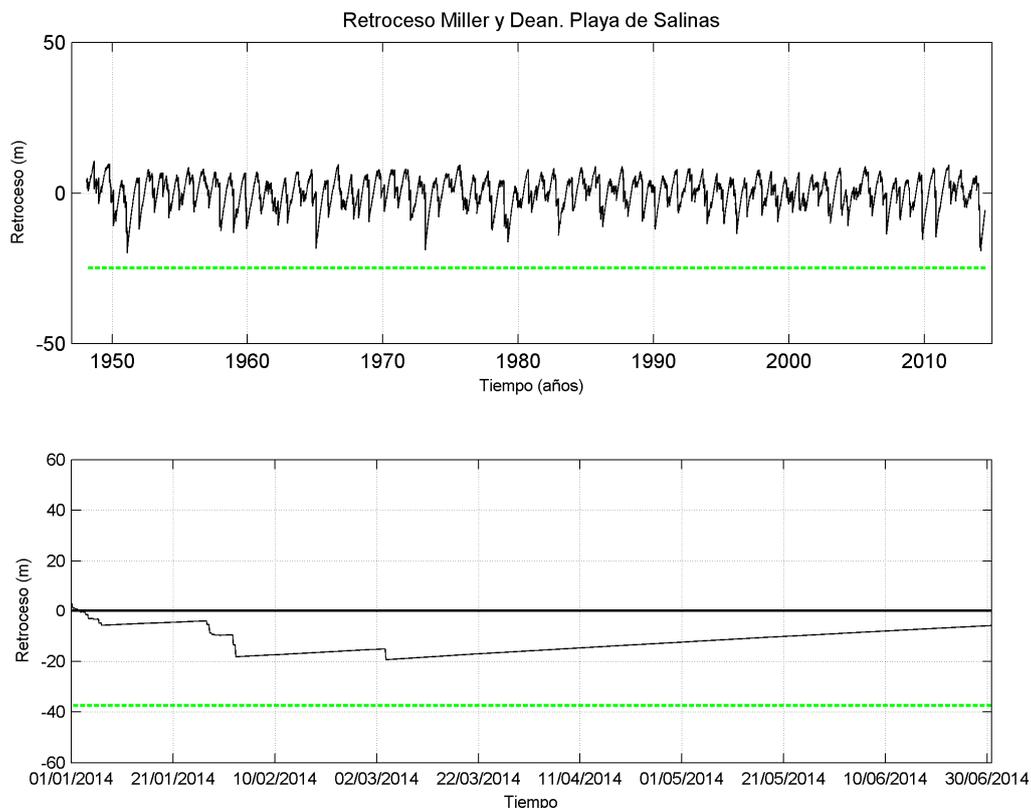


Figura 4.6. Serie temporal de erosión-acreción de la playa de Salinas obtenida con Miller y Dean (panel superior). Zoom de la serie de enero-junio de 2014 (panel inferior).

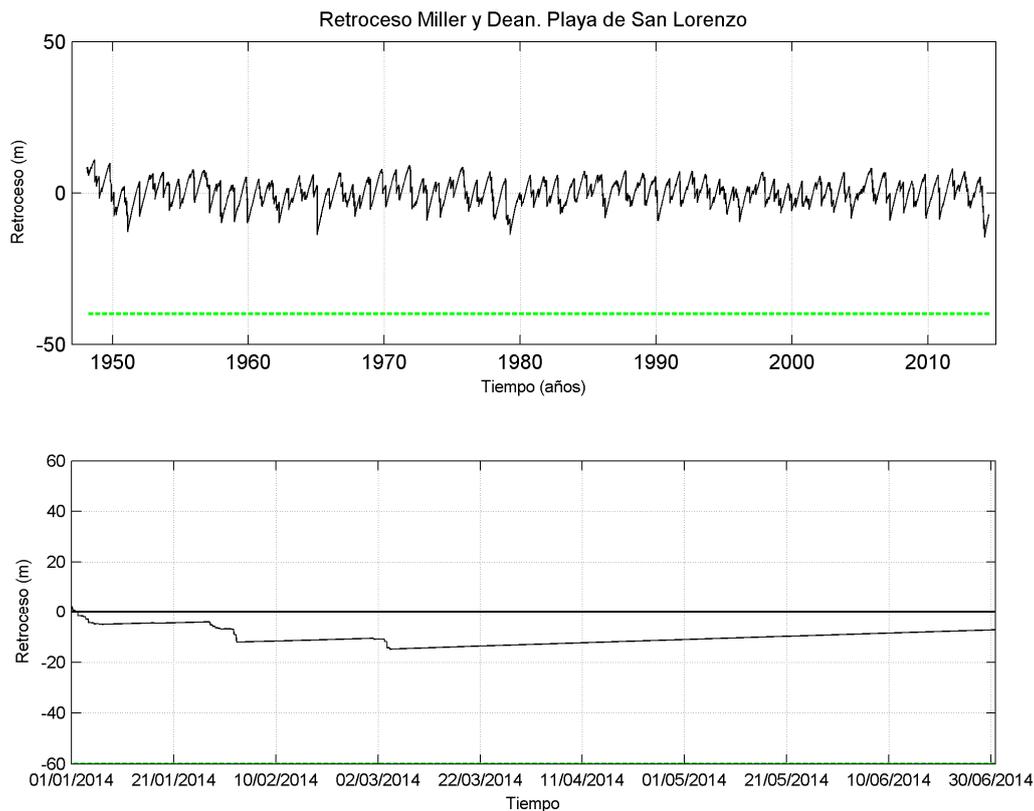


Figura 4.7. Serie temporal de erosión-acreción de la playa de San Lorenzo obtenida con Miller y Dean (panel superior). Zoom de la serie de enero-junio de 2014 (panel inferior).

En los tres casos, se pueden observar claramente los efectos de los temporales que tuvieron lugar en los meses de febrero y marzo de 2014. El patrón es similar: tras los temporales de febrero, las playas no tuvieron tiempo para recuperarse y la erosión a la que se llegó tras el evento ocurrido en marzo fue la acumulada de todo el invierno. La recuperación, no obstante, fue algo más lenta en la playa de San Lorenzo.

Las figuras 4.8, 4.9 y 4.10 y muestran la variabilidad interanual de la erosión acumulada durante los meses de invierno para cada una de las tres playas seleccionadas.

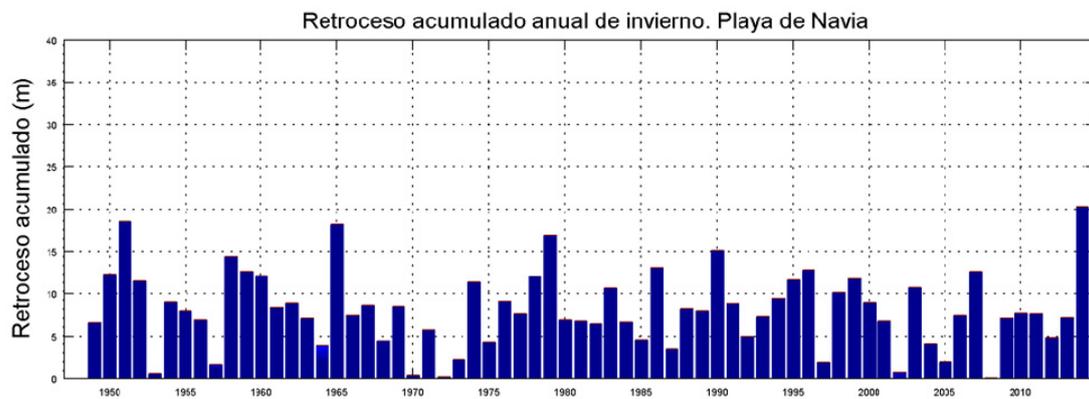


Figura 4.8. Retroceso acumulado anual de invierno en la playa de Navia.



Figura 4.9. Retroceso acumulado anual de invierno en la playa de Salinas.



Figura 4.10. Retroceso acumulado anual de invierno en la playa de San Lorenzo.

Como se ha podido observar, y dado que en el cantábrico los temporales proceden del noroeste, Navia y Salinas son las que mayores retrocesos acumulan anualmente. La playa de san Lorenzo, al abrigo del Cabo Peñas, acumula retrocesos algo menores. Cabe destacar, además, que 2014 ha sido el año del periodo de estudio (1947-2014) en el que mayores erosiones han acumulado en las tres playas.

A continuación, se muestran los regímenes extremal y medio de las playas objeto de estudio.

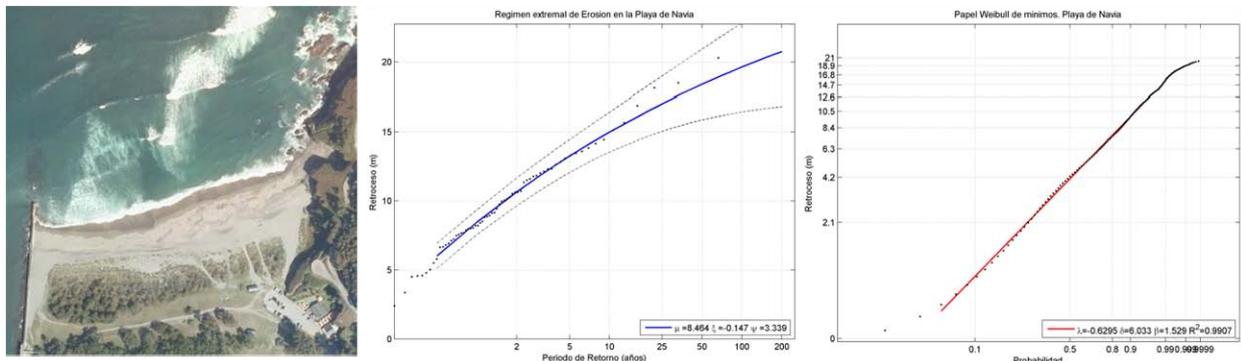


Figura 4.11. Regímenes extremal (segundo panel) y medio (tercer panel) de la playa de Navia.

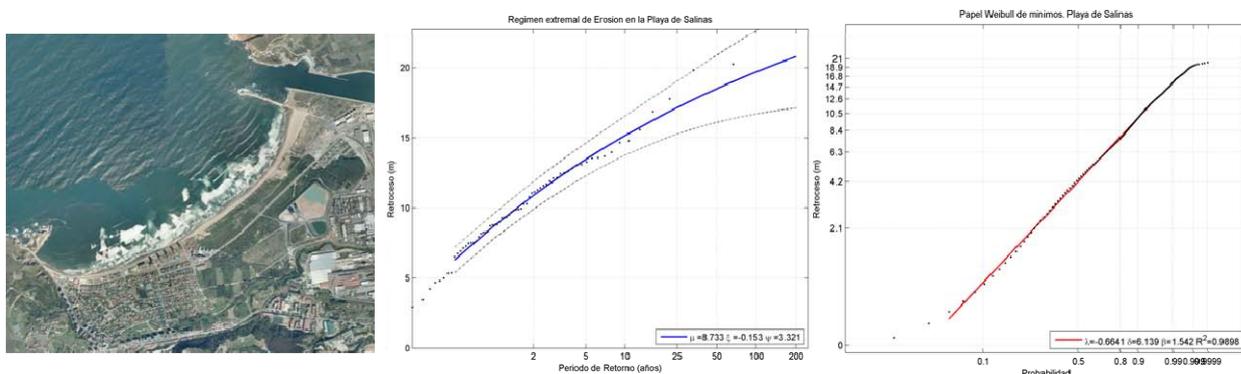


Figura 4.12. Regímenes extremal (segundo panel) y medio (tercer panel) de la playa de Salinas.

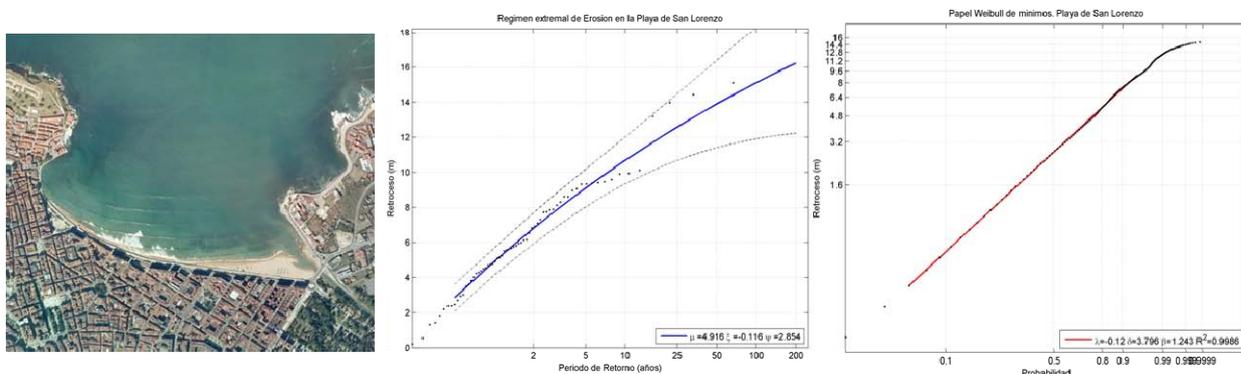
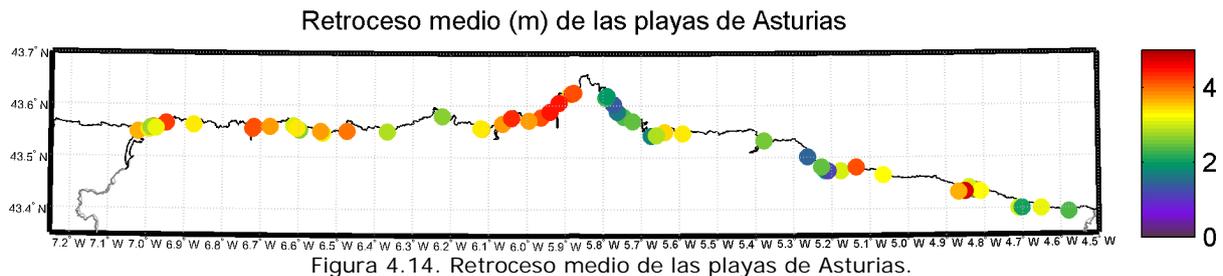


Figura 4.13. Regímenes extremal (segundo panel) y medio (tercer panel) de la playa de San Lorenzo.

Para la obtención del régimen extremal, en los tres casos se ha ajustado a una Función Generalizada de Extremos (GEV, de sus siglas en inglés). Por otro lado, el régimen medio se ha obtenido ajustando a una función de distribución de Weibull de mínimos.

La figura 4.14 indica el retroceso medio de las playas del litoral asturiano. Se puede observar cómo las playas situadas al oeste de Cabo Peñas sufren las mayores erosiones llegando a superar los 4 metros de retroceso de línea de costa.



Seguidamente, las figuras 4.15, 4.16, 4.17 y 4.18 muestran los cuantiles de retrocesos de 5, 10, 25 y 50 años de periodo de retorno. Asociados a estos y para cada playa, se ha calculado un indicador de erosión obtenido como resultado de dividir retroceso entre el ancho de playa. Este indicador nos da una idea del retroceso que se puede asumir de acuerdo a la anchura de playa seca de la que se dispone y varía entre valores muy pequeños en el entorno del 0, para los casos más favorables, y 1.5 para el más desfavorable, entendiéndose que a partir de 1 la playa seca prácticamente se habría perdido.

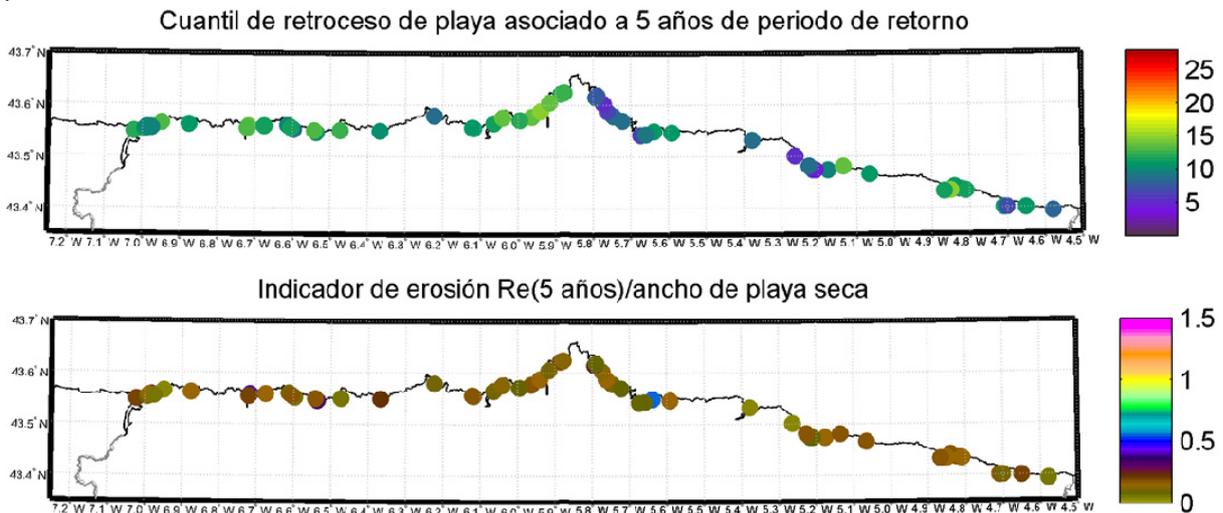


Figura 4.15. Retroceso asociado al cuantil de 5 años de periodo de retorno (panel superior). Indicador de erosión asociado al cuantil de 5 años de periodo de retorno (panel inferior).

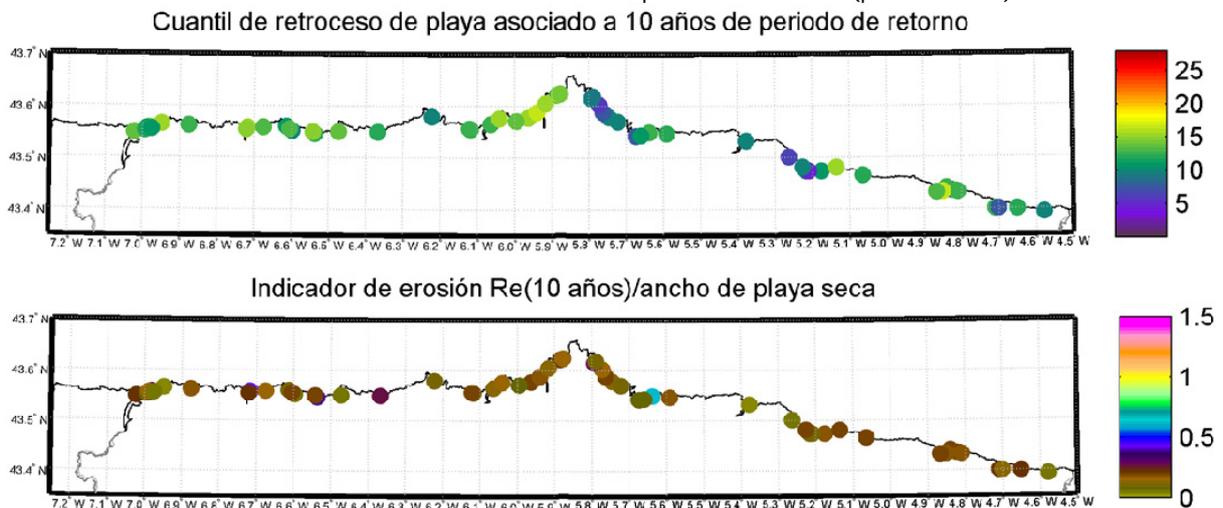


Figura 4.16. Retroceso asociado al cuantil de 10 años de periodo de retorno (panel superior). Indicador de erosión asociado al cuantil de 10 años de periodo de retorno (panel inferior).

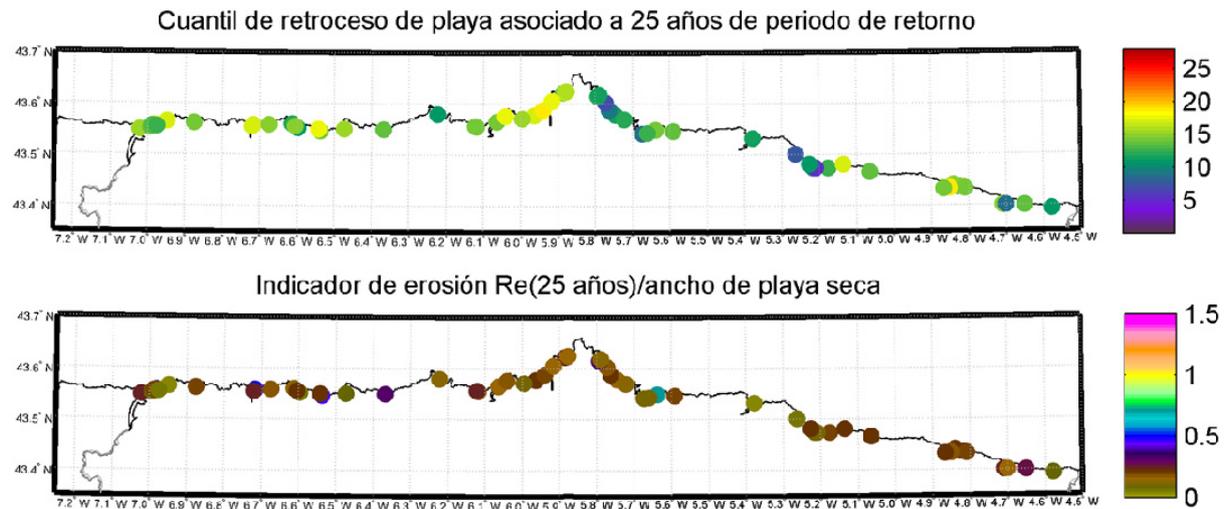


Figura 4.17. Retroceso asociado al cuantil de 25 años de periodo de retorno (panel superior). Indicador de erosión asociado al cuantil de 25 años de periodo de retorno (panel inferior).

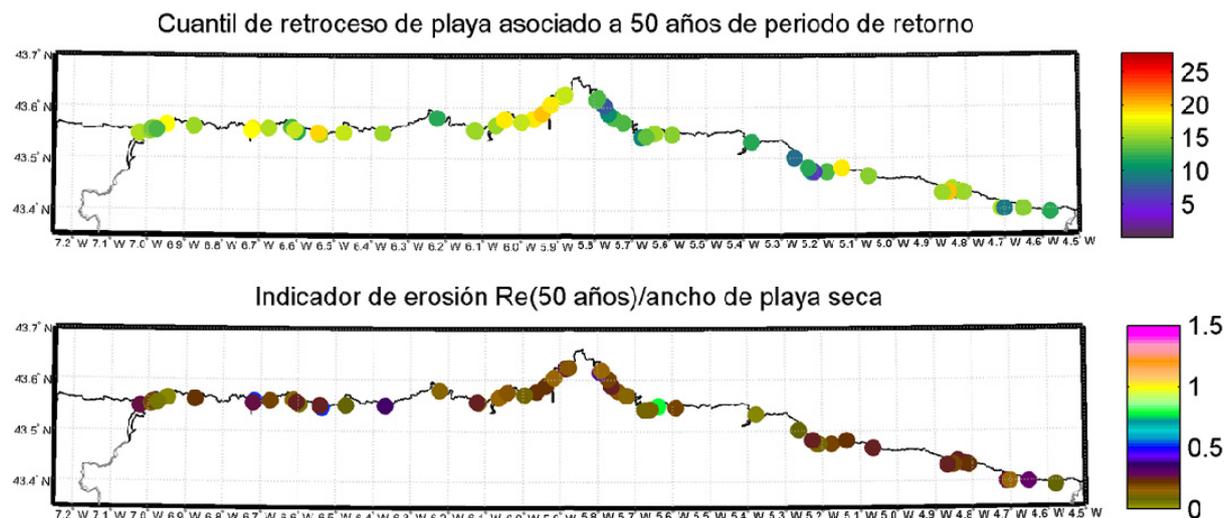


Figura 4.18. Retroceso asociado al cuantil de 50 años de periodo de retorno (panel superior). Indicador de erosión asociado al cuantil de 50 años de periodo de retorno (panel inferior).

El valor del indicador de 5 años de periodo de retorno en la playa de Cervigón es de 0.55. Asociados a periodos de retorno de 10 años, además de Cervigón que excede el valor del indicador de 0.6, las playas de El Moro y Luarca alcanzan valores en el entorno del 0.5. Así, a medida que aumenta el periodo de retorno del retroceso, el valor de los indicadores de erosión de las playas aumenta también. En el caso del indicador de 50 años de periodo de retorno, las playas de Mexota y La Ribera alcanzan valores de 0.37 y 0.38, respectivamente, El Moro y Luarca superan el 0.5 y la de Cervigón llega al valor de 0.77, asumiendo que a partir de 0.8 la anchura de playa seca remanente es crítica y habría que actuar para no perderla del todo.

4.6.2. Retroceso de la línea de costa debido al aumento del nivel del mar

La conocida "Regla de Bruun" establece que un ascenso del nivel medio del mar provocará un retroceso del perfil de playa. Las figuras 4.19, 4.20, 4.21 y 4.22 muestran la respuesta que pueden presentar las diferentes playas del Principado de Asturias frente a aumentos de 0.24, 0.45, 0.65 y 1 metro de nivel, respectivamente.

Retroceso debido a un aumento del nivel del mar de 0.24 m

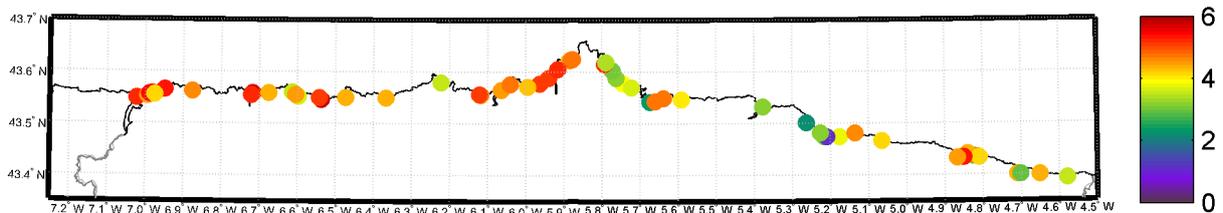


Figura 4.19. Retroceso de las playas de Asturias debido a un aumento del nivel medio del mar de 24 cm en el año horizonte 2050.

Retroceso debido a un aumento del nivel del mar de 0.45 m

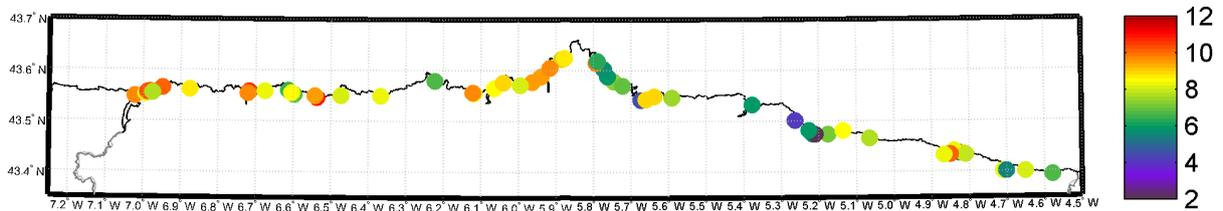


Figura 4.20. Retroceso de las playas de Asturias debido a un aumento del nivel medio del mar de 45 cm en el año horizonte 2100.

Retroceso debido a un aumento del nivel del mar de 0.65 m

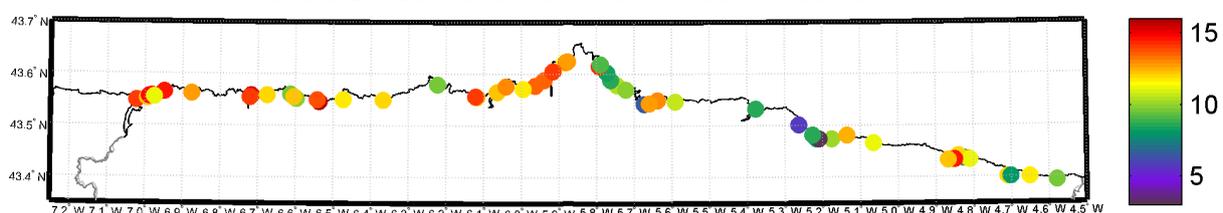


Figura 4.21. Retroceso de las playas de Asturias debido a un aumento del nivel medio del mar de 65 cm en el año horizonte 2100.

Retroceso debido a un aumento del nivel del mar de 1 m

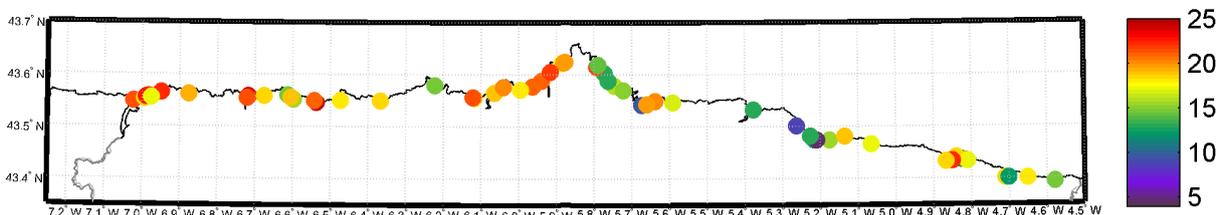


Figura 4.22. Retroceso de las playas de Asturias debido a un aumento del nivel medio del mar de 1 m en el año horizonte 2100.

Sólo teniendo en cuenta la variable nivel medio del mar, vinculada a los efectos del cambio climático en el litoral, se puede observar que en el año horizonte 2050 y con un aumento de 0.25 m la mayoría de playas de Asturias perderán entre 4 y 6 metros de playa seca, muchas de ellas situadas al oeste de Cabo Peñas. A fin de siglo, el patrón es

similar pero llegando a alcanzar los 11, 15 y 25 metros de retroceso de línea de costa para aumentos del nivel medio del mar de 0.45, 0.65 y 1 metros, respectivamente. No obstante, para evaluar la magnitud real del retroceso de la línea de costa en cada playa, es necesario referir este valor al ancho medio. De este modo, se puede saber qué playas se encontrarán en una situación crítica a medio y largo plazo en caso de no actuar al respecto. Las figuras 4.23-4.26 muestran el porcentaje de playa seca perdida para cada aumento del nivel medio del mar considerado.

Porcentaje de ancho de playa perdido debido a un aumento del nivel del mar de 0.24 m

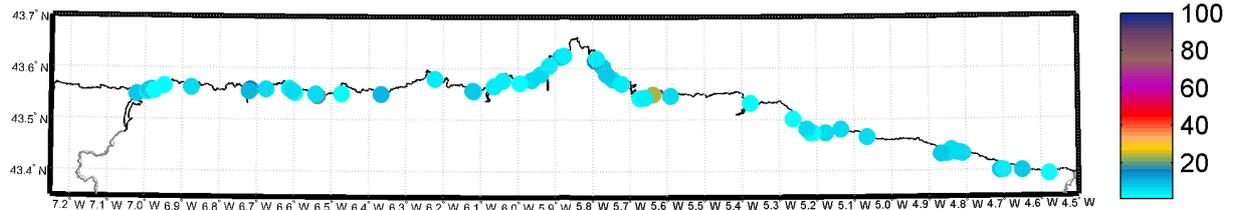


Figura 4.23. Porcentaje de ancho de playa perdido debido a un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m en el año horizonte 2050.

Porcentaje de ancho de playa perdido debido a un aumento del nivel del mar de 0.45 m

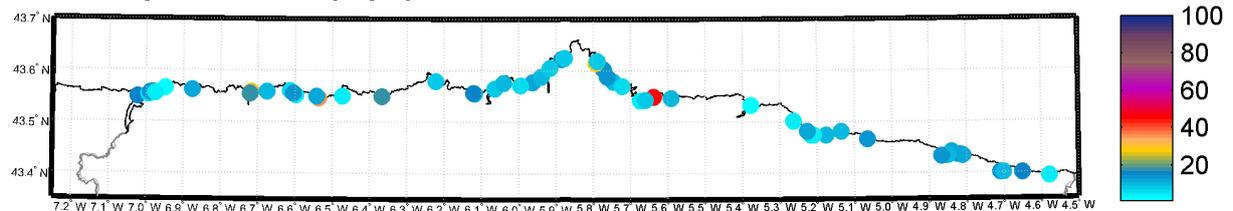


Figura 4.24. Porcentaje de ancho de playa perdido debido a un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m en el año horizonte 2100.

Porcentaje de ancho de playa perdido debido a un aumento del nivel del mar de 0.65 m

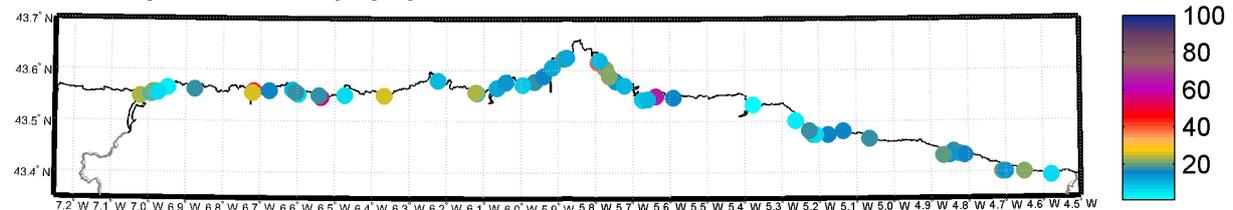


Figura 4.25. Porcentaje de ancho de playa perdido debido a un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m en el año horizonte 2100.

Porcentaje de ancho de playa perdido debido a un aumento del nivel del mar de 1 m

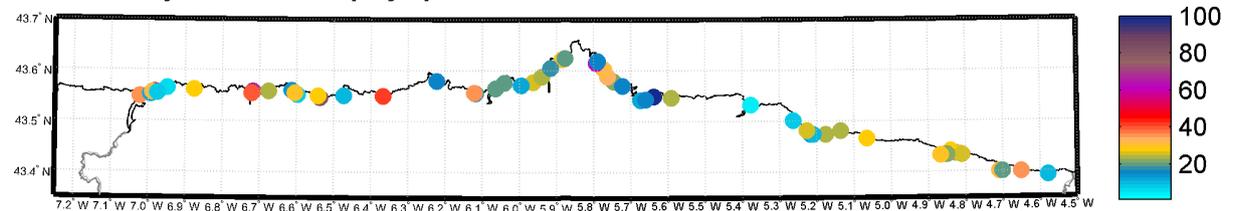


Figura 4.26. Porcentaje de ancho de playa perdido debido a un aumento del nivel medio del mar de 1 m en el año horizonte 2100.

De acuerdo a los resultados obtenidos, para 1 m de aumento del nivel medio del mar, la playa de Cervigón desaparecerá y Luarda, El Moro y la Ribera perderán el 99%, 81%, 67% y 62% de su anchura media actual. Mexota y Cadavedo verán reducido su ancho medio de playa seca a aproximadamente la mitad.

Para traducir este retroceso en pérdida de volumen de sedimento se ha aplicado una adaptación de la ecuación empleada por Hinkel et al. (2013):

$$V = LRh \quad (1)$$

Donde L es la longitud de playa, R es el retroceso debido al aumento del nivel medio del mar y h es la altura activa del perfil, calculada como la suma de la profundidad de cierre, la altura de la berma y la carrera de marea.

A continuación se muestran las figuras 4.27, 4.28, 4.29 y 4.30 con los resultados obtenidos para los distintos escenarios propuestos.

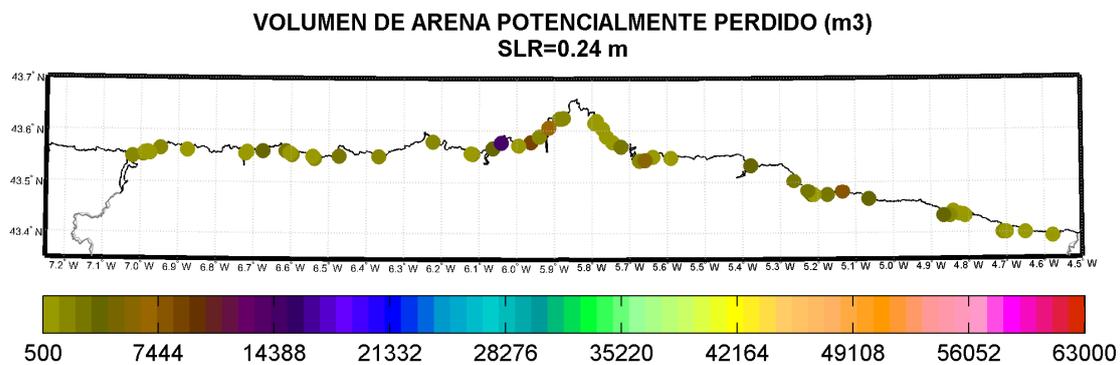


Figura 4.27. Volumen de arena potencialmente perdido debido a un aumento del nivel medio del mar de 24 cm en el año horizonte 2050.

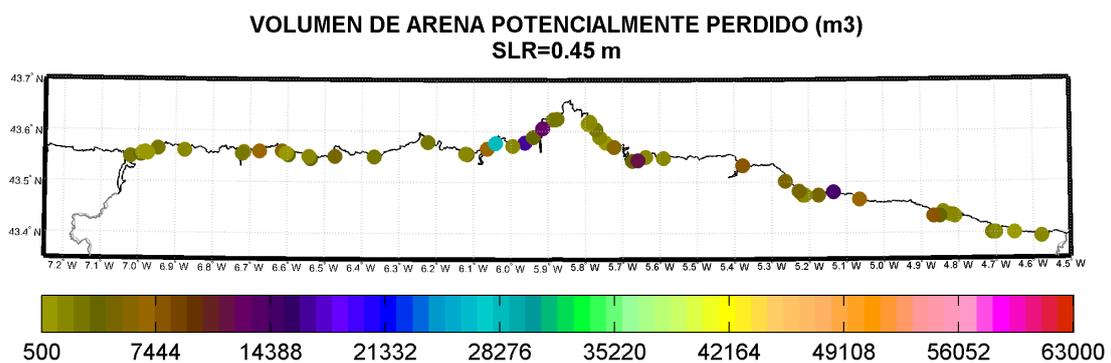


Figura 4.28. Volumen de arena potencialmente perdido debido a un aumento del nivel medio del mar de 45 cm en el año horizonte 2100.

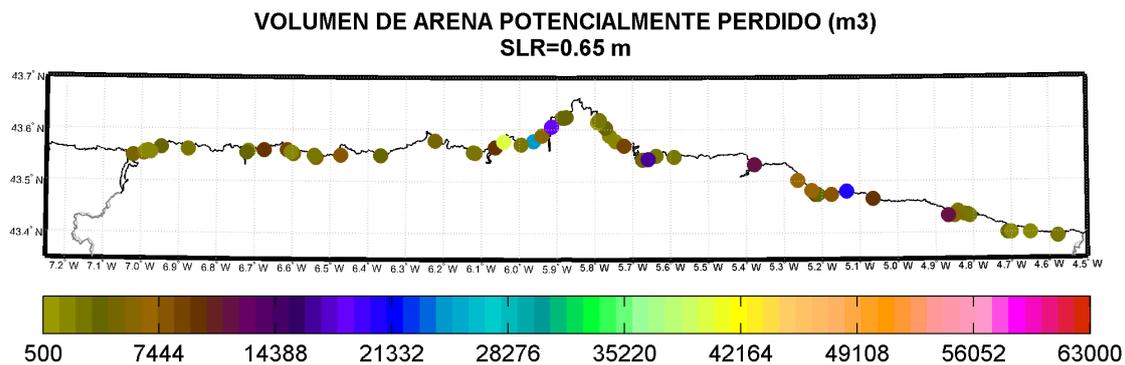


Figura 4.29. Volumen de arena potencialmente perdido debido a un aumento del nivel medio del mar de 65 cm en el año horizonte 2100.

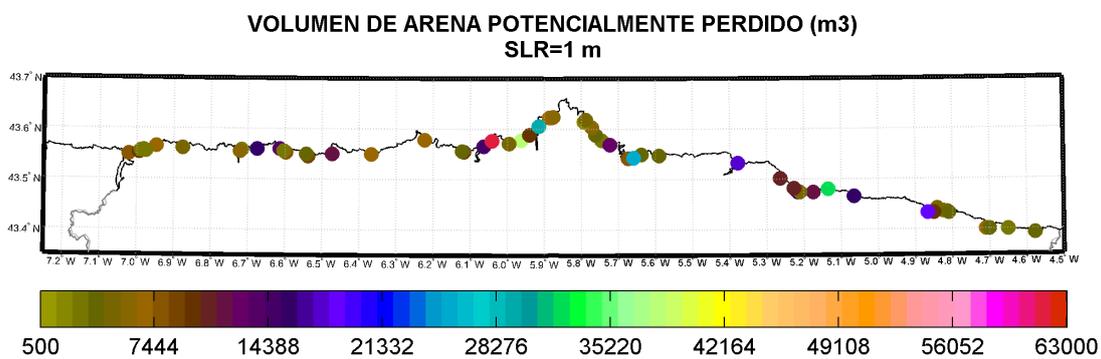


Figura 4.30. Volumen de arena potencialmente perdido debido a un aumento del nivel medio del mar de 1 m en el año horizonte 2100.

Con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m, en el año horizonte 2050, el Playón de Bayas perderá hasta 15000 m³ de arena, seguida de la playa de Salinas con más de 9000 m³ de déficit sedimentario. Con 0.45 m de incremento del nivel, a 2100, otras playas como Vega, Xagó, San Lorenzo y Vidiago perderán más de 11000 m³ de arena. Rodiles y San Antolín requerirán un volumen de sedimento considerable a partir de 0.65 m de subida del nivel medio del mar y, también a 2100, pero considerando un aumento del nivel medio del mar de 1 m, el Playón de Bayas y la playa de Salinas necesitarán hasta 63000 m³ y 40000 m³ de arena, respectivamente.

Otro parámetro que evidencia los efectos de los distintos aumentos del nivel medio del mar considerados es la superficie de playa potencialmente perdida, calculada como el producto del retroceso debido al aumento de nivel y del ancho de playa seca.

Las figuras 4.31, 4.32, 4.33 y 4.34 describen espacialmente los metros cuadrados de playa seca potencialmente perdidos para cada una de las playas de estudio y para cada escenario propuesto.

SUPERFICIE DE PLAYA POTENCIALMENTE PERDIDA (m²)
SLR=0.24 m

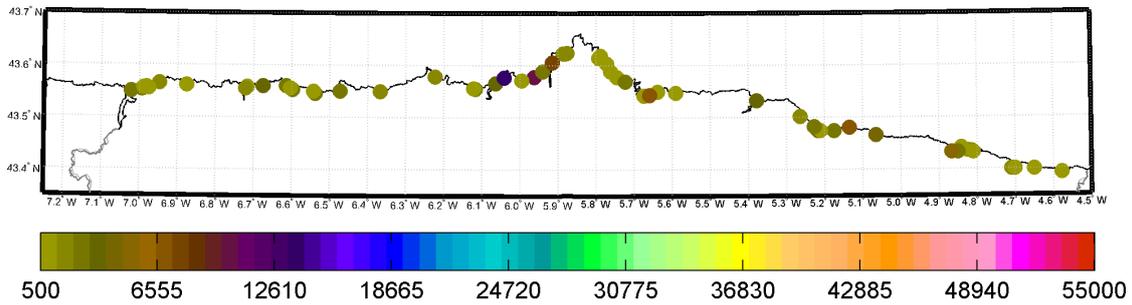


Figura 4.31. Superficie de playa potencialmente perdida debido a un aumento del nivel medio del mar de 24 cm en el año horizonte 2050.

SUPERFICIE DE PLAYA POTENCIALMENTE PERDIDA (m²)
SLR=0.45 m

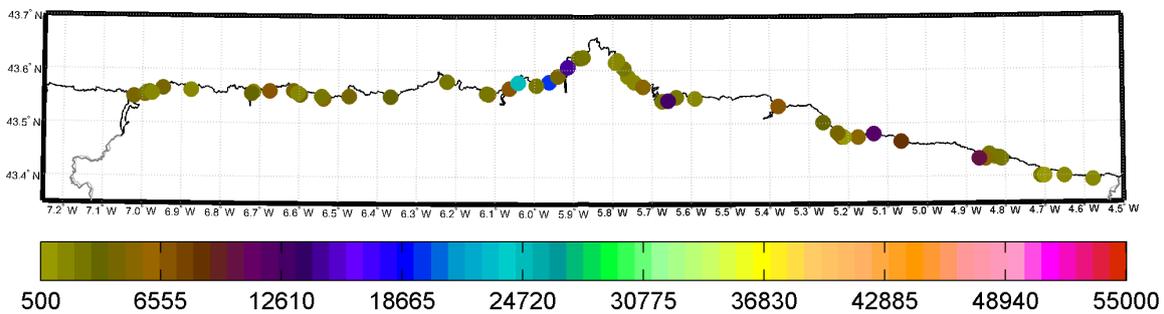


Figura 4.32. Superficie de playa potencialmente perdida debido a un aumento del nivel medio del mar de 45 cm en el año horizonte 2100.

SUPERFICIE DE PLAYA POTENCIALMENTE PERDIDA (m²)
SLR=0.65 m

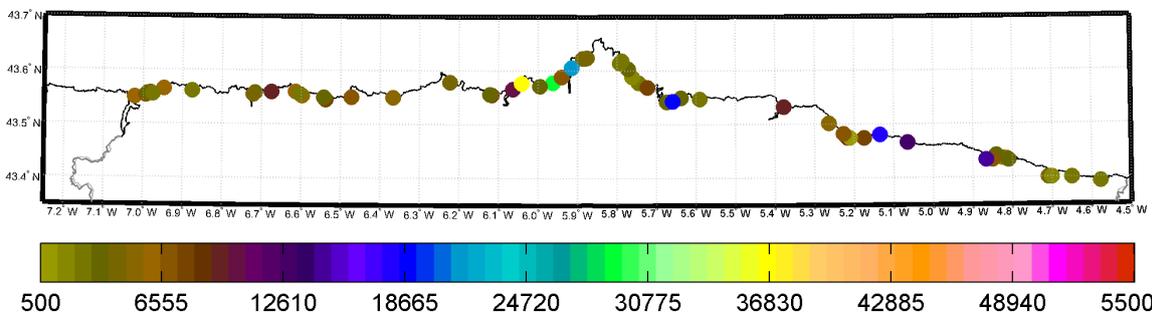


Figura 4.33. Superficie de playa potencialmente perdida debido a un aumento del nivel medio del mar de 65 cm en el año horizonte 2100.

SUPERFICIE DE PLAYA POTENCIALMENTE PERDIDA (m²)
SLR=1 m

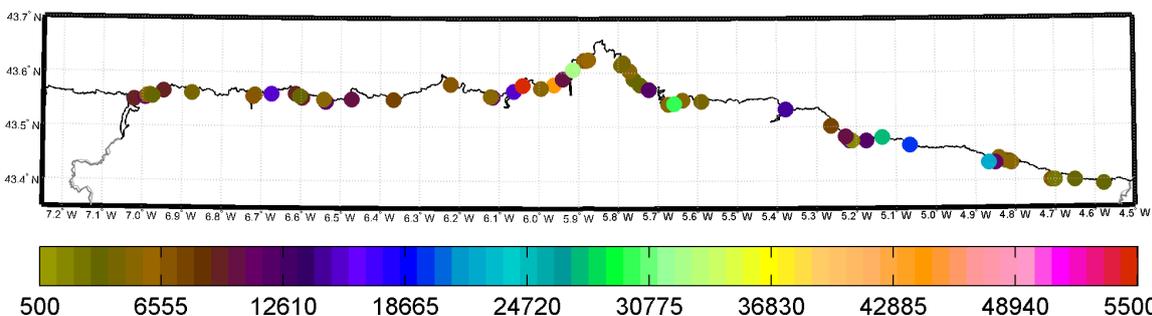


Figura 4.34. Superficie de playa potencialmente perdida debido a un aumento del nivel medio del mar de 1 m en el año horizonte 2100.

A mitad de siglo, el Playón de Bayas y Salinas perderán 13400 y 10600 m² de arena. Las playas de Xagó y San Lorenzo verán reducida su superficie en más de 7000 m². A final de siglo, con 1 m de aumento del NMM, las playas más afectadas serán el Playón de Bayas con una pérdida de 63000 m², Salinas con 40000 m², Xagó con 32000 m², San Lorenzo con 29500 m² y Vega con más de 27000 m².

4.6.3. Agregación de los efectos de corto plazo al aumento del nivel del mar

Para evaluar el retroceso de la línea de costa a medio y largo plazo (años horizonte 2050 y 2100, respectivamente) no es suficiente con tener en cuenta el aumento del nivel medio del mar sino que otras variables, como son la marea meteorológica, la marea astronómica y el oleaje, deben ser tenidas en cuenta. Sin embargo, en la práctica, no está claro cómo resolver la interacción y acoplamiento entre las distintas escalas. En este apartado, se proponen tres aproximaciones diferentes para agregar los efectos del corto plazo al aumento del nivel medio del mar.

Se ha partido de la base de datos regional de nivel medio del mar desarrollada por IHCantabria a partir del método propuesto por Church et al. (2004). Para la reconstrucción de esta base de datos se han utilizado registros de mareógrafos y satelitales (satélite sólo desde 1993). La variable nivel medio del mar procesada presenta las siguientes correcciones sobre la información procedente de mareógrafos: (i) eliminación de la variación estacional media; (ii) corrección de barómetro inverso; y (iii) corrección GIA (Glacial Isostatic Adjustment, Mitrovia).

El registro de nivel del mar que se ha utilizado constituye el nodo más cercano a la playa de Navia (véase la figura 4.35). En la figura 4.36 se muestra la reconstrucción del nivel medio del mar (mm) para el nodo especificado.

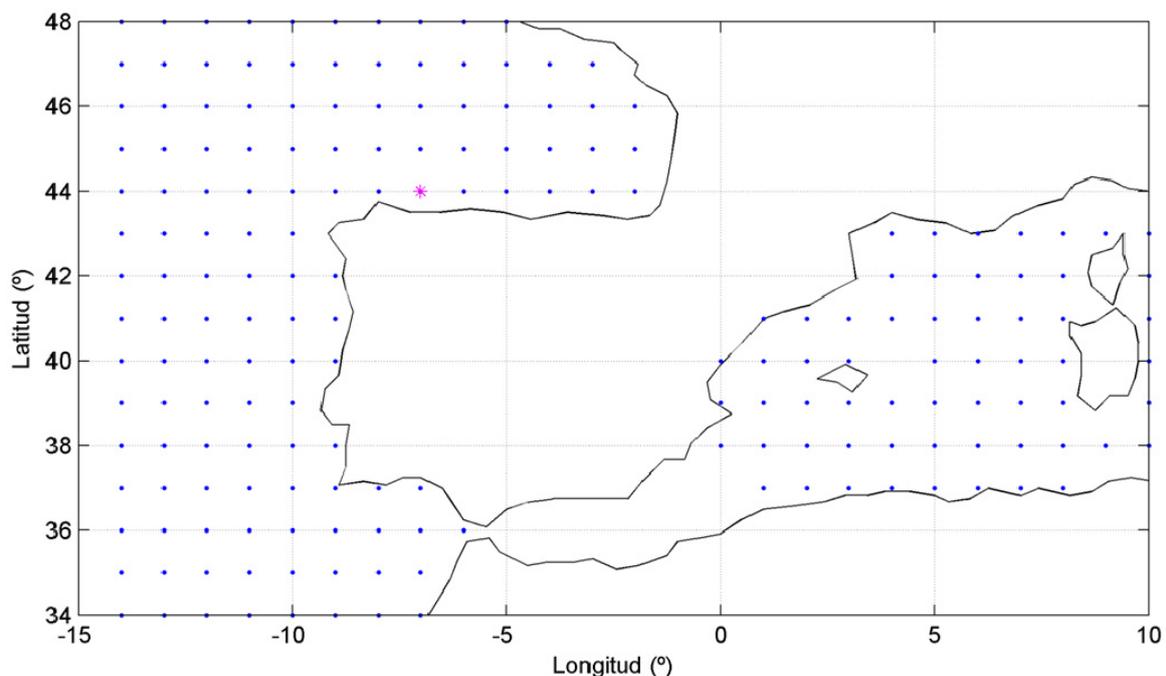


Figura 4.35. Detalle de la malla de la base de datos en España y nodo próximo a la playa de Navia.

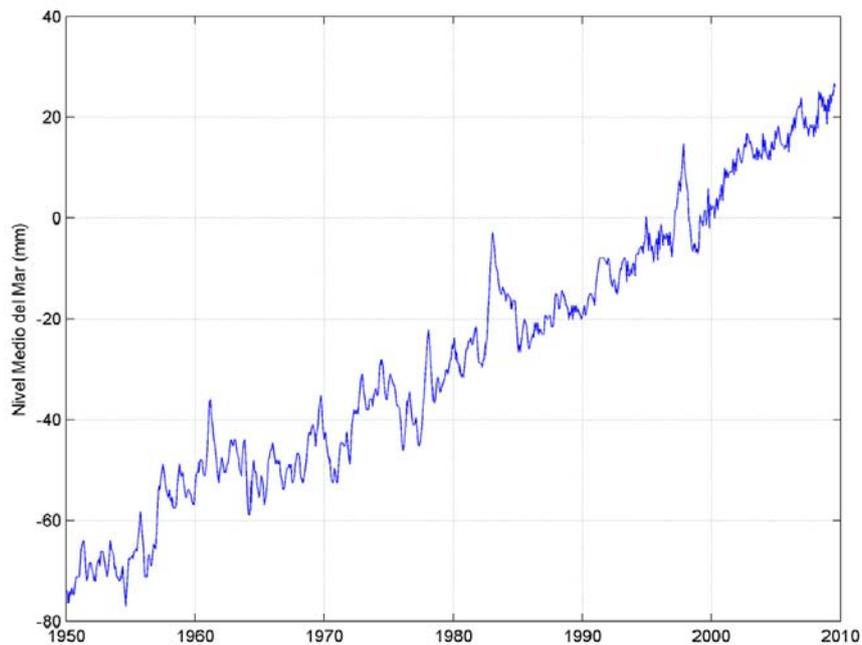


Figura 4.36. Serie temporal del nivel medio del mar en la región de Navia.

En la actualidad, se conoce cómo ha cambiado el nivel medio del mar desde 1950 hasta el día de hoy y, por tanto, qué efectos han tenido estos cambios sobre la erosión costera. La figura 4.37 muestra el efecto del incremento de nivel en la serie histórica de erosión-acreción en la playa de Navia.

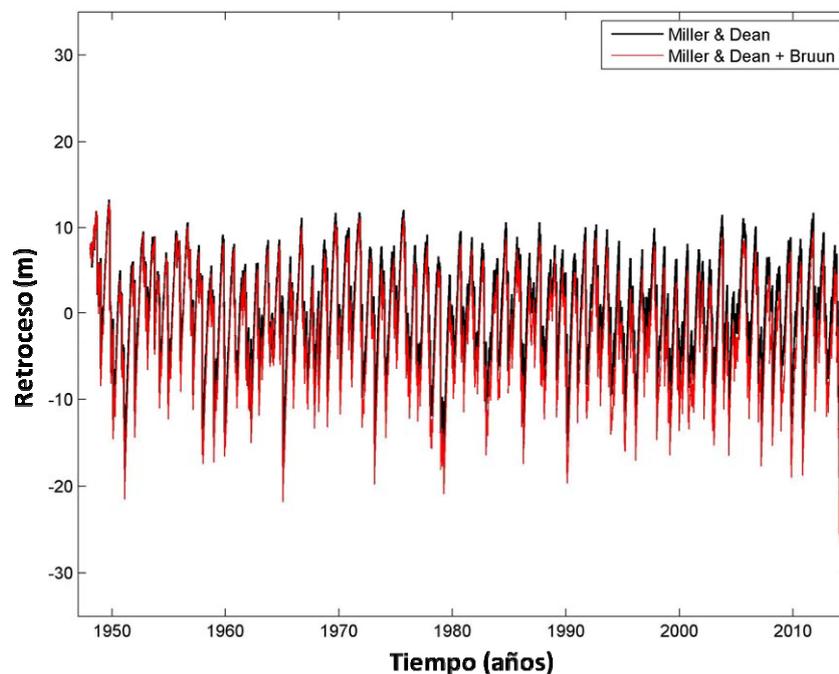


Figura 4.37. Efecto del aumento del nivel medio del mar en la serie histórica de erosión – acreción.

Pero, ¿cómo influirá el aumento del nivel medio del mar sobre la erosión futura? En este análisis se pretende estimar qué efectos tendrá el cambio climático sobre las playas asturianas a lo largo del siglo XXI.

En primer lugar, se muestra la comparación de la serie temporal de erosión-acreción obtenida con la formulación de Miller y Dean (2004) en la playa de Navia, que únicamente tiene en cuenta las variaciones del nivel del mar debidas a la combinación de marea meteorológica, marea astronómica y set-up del oleaje, y las tres aproximaciones propuestas que, además de los efectos de corto plazo, incorporan el aumento del nivel medio del mar. La figura 4.38 corresponde al escenario de 0.24 m de aumento del nivel medio del mar (año horizonte 2050).

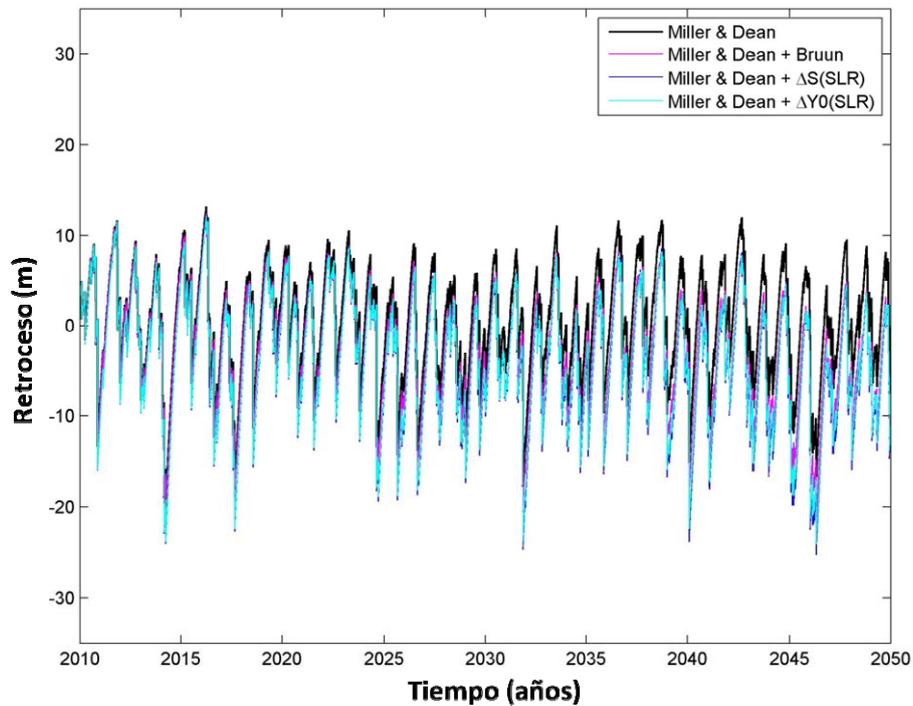


Figura 4.38. Comparación de la serie temporal de erosión-acreción de Miller y Dean con las tres aproximaciones propuestas para tener en cuenta los efectos de corto plazo y un aumento del nivel medio del mar de 24 cm en la playa de Navia.

La primera aproximación consiste en sumar linealmente los retrocesos por aumento del nivel medio del mar obtenidos con el modelo de Bruun (1962), $R(t)$, a la serie temporal de erosión-acreción obtenida con el modelo de Miller y Dean (2004). Dado que los 67 años de datos de altura de ola, marea meteorológica y marea astronómica de los que se dispone empiezan en 1947 y finalizan en 2014, se asume que, a 2050 y a 2100, las dinámicas no van a cambiar. Si bien esto último no es cierto, los cambios obtenidos tras el estudio de tendencias históricas y proyecciones para escenarios RCP de estas variables no son significativos (véase el informe de la Tarea 2.3.) y, de este modo, se puede tener una idea de los posibles efectos del cambio climático sobre la evolución de la línea de costa. El retroceso de Bruun se ha imputado en cada instante como una fracción del mismo acumulada horariamente a lo largo de la serie temporal.

La segunda aproximación propuesta en este trabajo se basa en incluir el aumento del nivel medio del mar, $SLR(t)$, como un nivel más en el numerador de la ecuación 4.6 de Miller y Dean. Para imputar el nivel con dependencia temporal, se ha calculado la pendiente del aumento del nivel del mar de forma lineal y se ha determinado la tasa de crecimiento horario, acumulada a lo largo de la serie temporal.

Finalmente, se ha planteado una tercera aproximación que consiste en incorporar el aumento del nivel medio del mar en el término ΔY_0 de la ecuación 4.5 de Miller y Dean, por lo que ΔY_0 pasa a ser $\Delta Y_0(t) = \Delta Y_0 + R(SLR(t))$ con $R(SLR(t))$ calculado con el modelo de Bruun. De este modo, y de acuerdo a la teoría de Bruun, el aumento del nivel medio del mar se traduce en un retroceso de la línea de costa que restringe las posiciones de avance (acreciones) del perfil.

Las figuras 4.39, 4.40 y 4.41 muestran nuevamente la serie de la figura 4.38 y dos zooms de los periodos 1965-1980 y 2000-2014, respectivamente, para un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m (horizonte 2050) en la playa de Navia.

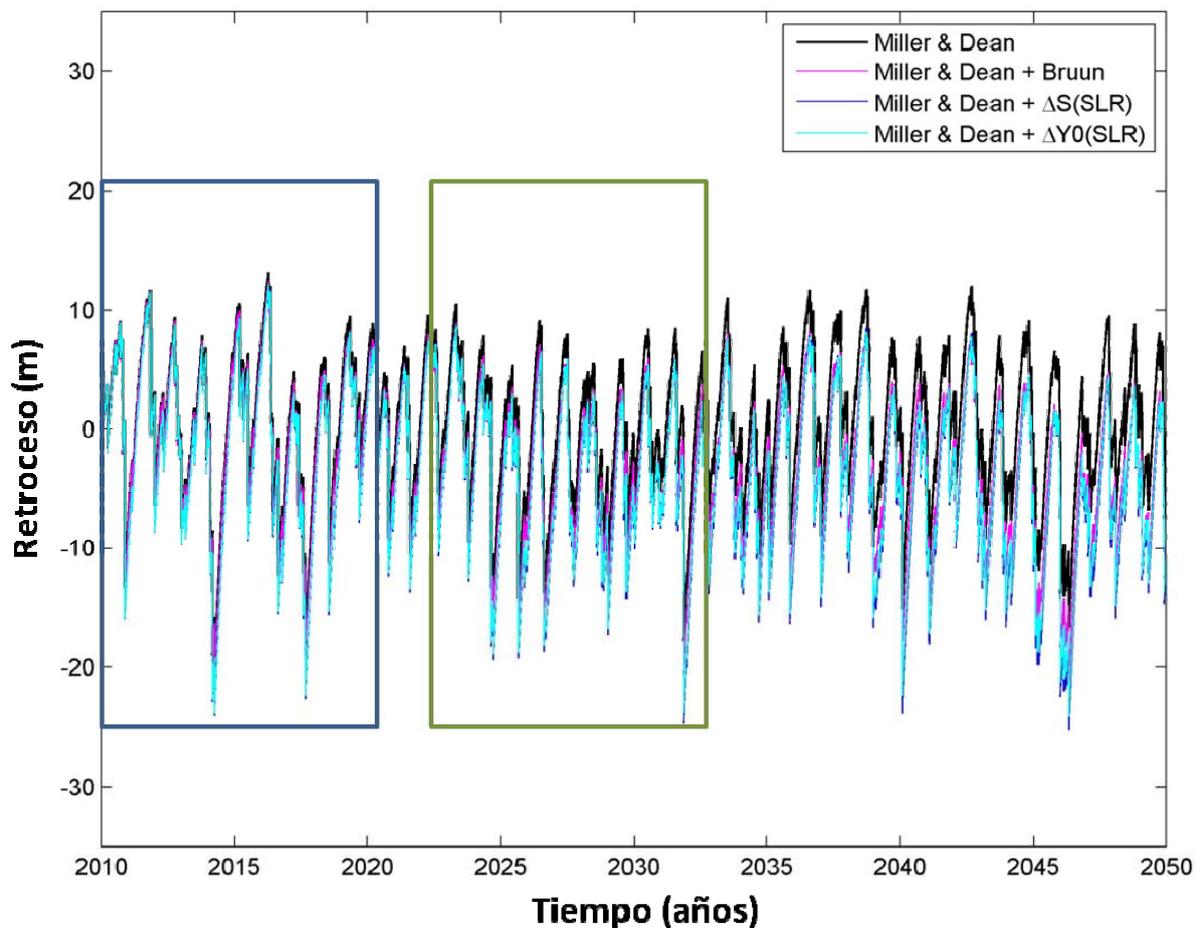


Figura 4.39. Comparación de la serie temporal de erosión-acreción de Miller y Dean con las tres aproximaciones propuestas para tener en cuenta los efectos de corto plazo y un aumento del nivel medio del mar de 24 cm en la playa de Navia.

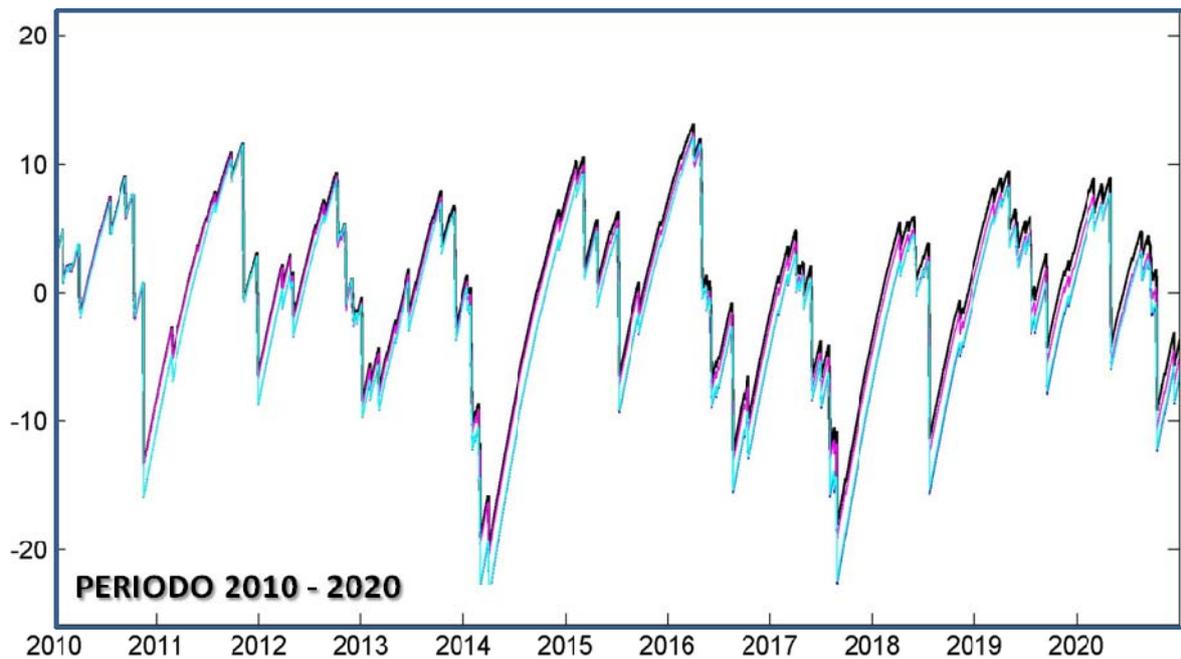


Figura 4.40. Comparación de la serie temporal de erosión-acreción de Miller y Dean con las tres aproximaciones propuestas para tener en cuenta los efectos de corto plazo y un aumento del nivel medio del mar de 24 cm para el periodo 1965-1980 en la playa de Navia.

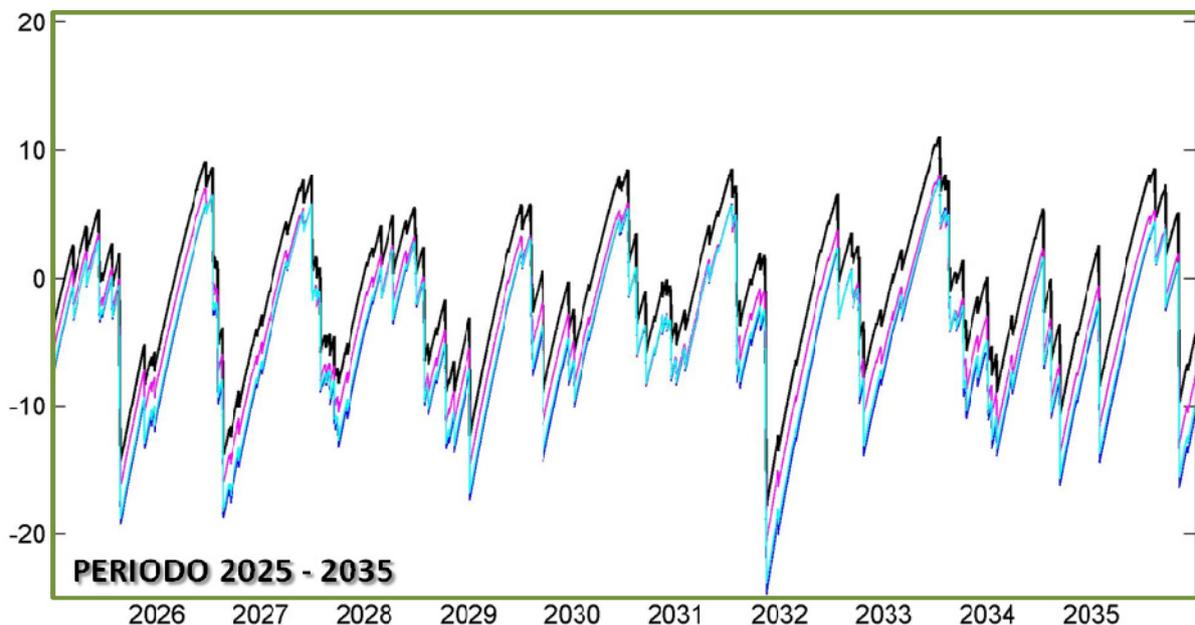


Figura 4.41. Comparación de la serie temporal de erosión-acreción de Miller y Dean con las tres aproximaciones propuestas para tener en cuenta los efectos de corto plazo y un aumento del nivel medio del mar de 24 cm para el periodo 2000-2014 en la playa de Navia.

Las tres aproximaciones proporcionan resultados similares lo que demuestra la consistencia del modelo utilizado. Se puede observar cómo la primera aproximación, la más simple, proporciona valores de erosión y acreción ligeramente superiores a los otros dos modelos. Por otro lado, los resultados de las aproximaciones dos y tres son muy parecidos con la diferencia de que, al incluir el retroceso calculado con Bruun en el

término ΔY_0 , las erosiones máximas son menores y las acreciones máximas mayores que en el caso de implementar el aumento del nivel medio del mar como un nivel más en la formulación existente. Bruun determina el retroceso en función de la profundidad de cierre (h^*) y Miller y Dean emplean la profundidad de rotura (h_b), por tanto, en las erosiones mayores, la profundidad h_b es mayor que la h^* , es decir, la longitud activa considerada por la segunda aproximación es mayor que la de la primera y, por el mismo motivo, ocurre lo contrario para las recuperaciones máximas. Sin embargo, la tendencia de ambas es muy similar. Otro aspecto destacable en la comparación de estos dos modelos es que, debido a que la velocidad de cambio cuando se está más alejado de la posición siguiente de equilibrio es mayor, el perfil más erosionado evoluciona más rápido al principio que el otro al pasar de erosión a acreción y, el que está más adelantado, cambia más rápido de acreción a erosión. Además de esto, se puede observar cómo las curvas en acreción empiezan con una pendiente ligeramente distinta y poco a poco van haciéndose tangentes.

Las figuras 4.42, 4.43 y 4.44 muestran otro ejemplo de comparación de la serie de Miller y Dean con las tres aproximaciones propuestas, en este caso para un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m (año horizonte 2100), y dos zooms de los periodos 1965-1980 y 200-2014, respectivamente, en la playa de Navia.

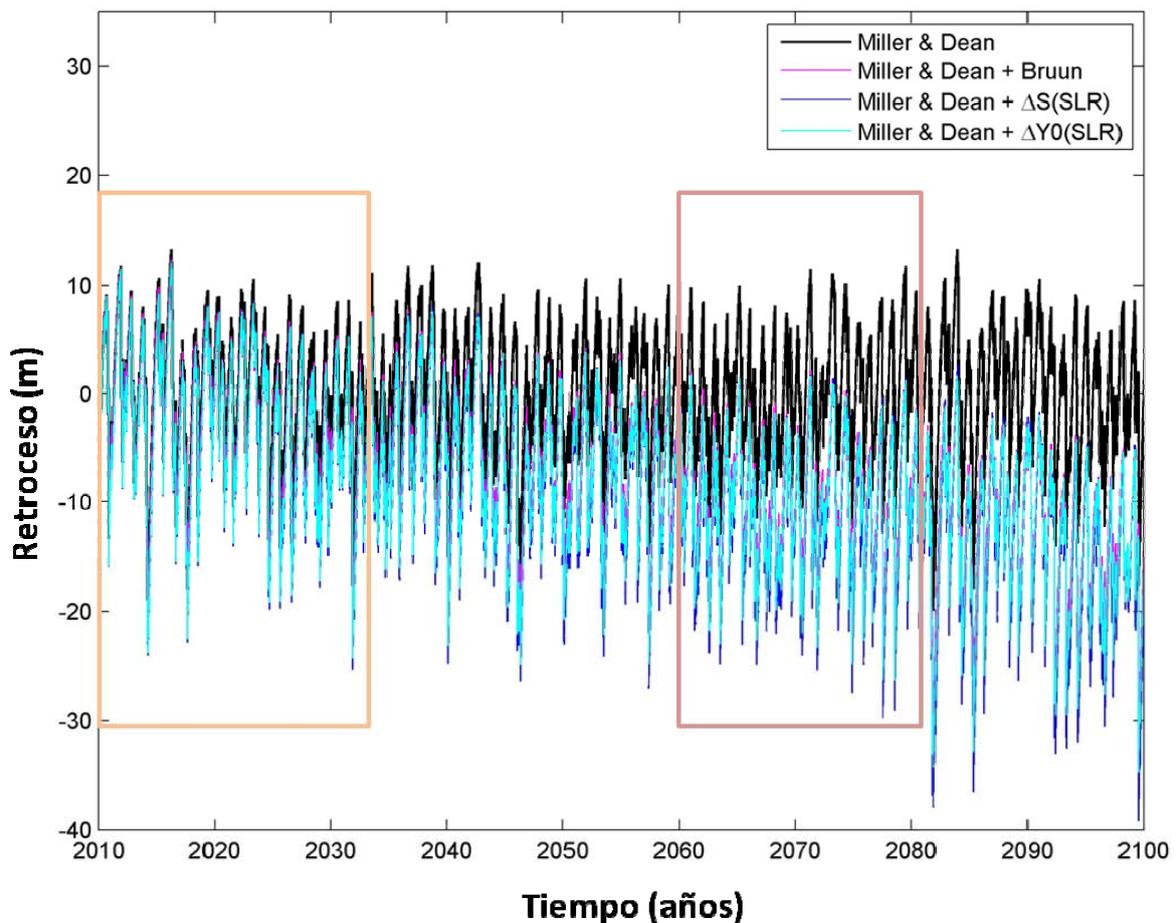


Figura 4.42. Comparación de la serie temporal de erosión-acreción de Miller y Dean con las tres aproximaciones propuestas para tener en cuenta los efectos de corto plazo y un aumento del nivel medio del mar de 65 cm en la playa de Navia.

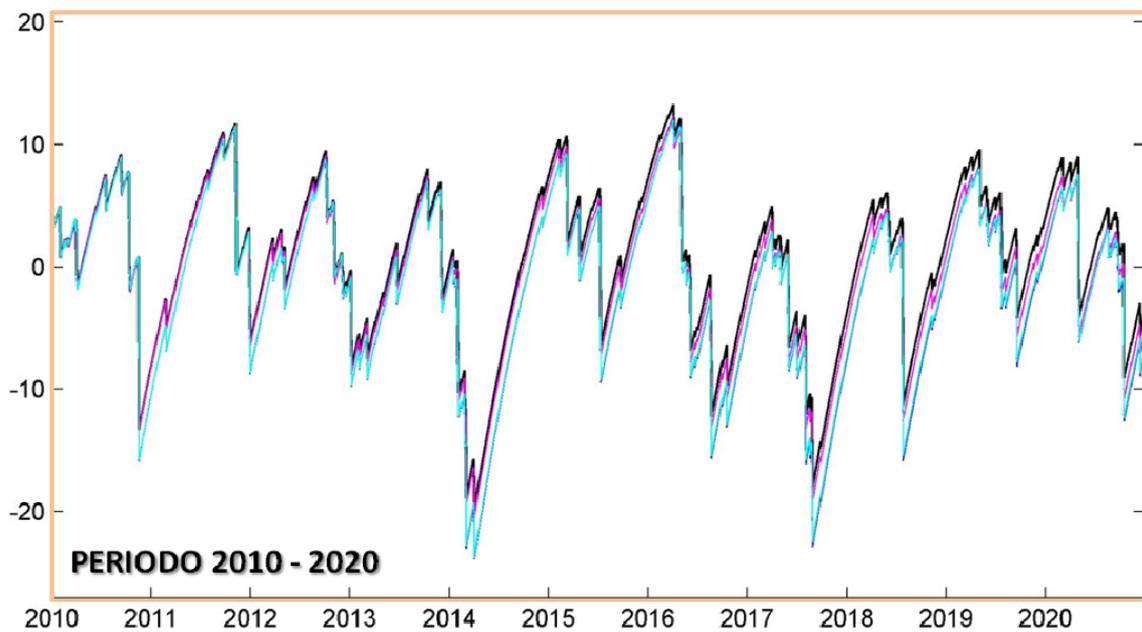


Figura 4.43. Comparación de la serie temporal de erosión-acreción de Miller y Dean con las tres aproximaciones propuestas para tener en cuenta los efectos de corto plazo y un aumento del nivel medio del mar de 65 cm para el periodo 1965-1980 en la playa de Navia.

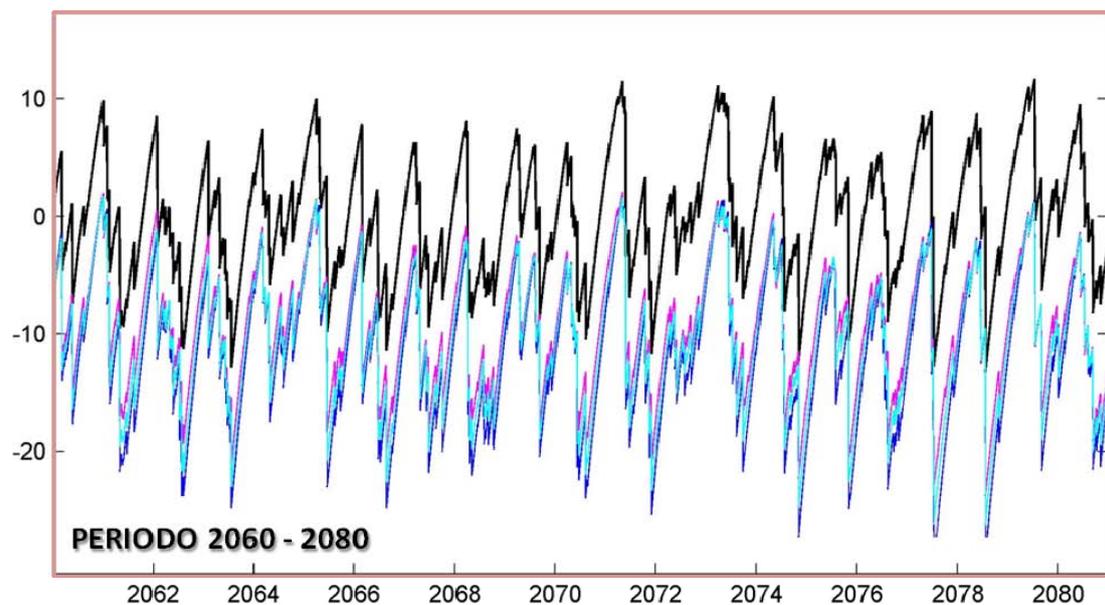


Figura 4.44. Comparación de la serie temporal de erosión-acreción de Miller y Dean con las tres aproximaciones propuestas para tener en cuenta los efectos de corto plazo y un aumento del nivel medio del mar de 65 cm para el periodo 2000-2014 en la playa de Navia.

A continuación, se muestran las series obtenidas con cada aproximación propuesta para los escenarios de aumento del nivel medio del mar de 0.24, 0.45, 0.65 y 1 metro planteados.

En primer lugar, se presentan los resultados obtenidos con la primera aproximación. Las figuras 4.45, 4.46, 4.47 y 4.48 muestran, para cada escenario climático, las series independientes de Miller y Dean y Bruun, ésta última reconstruida a base de incrementos de retroceso horarios acumulados, y la serie conjunta que tiene en cuenta los efectos de corto plazo y el aumento del nivel medio del mar.

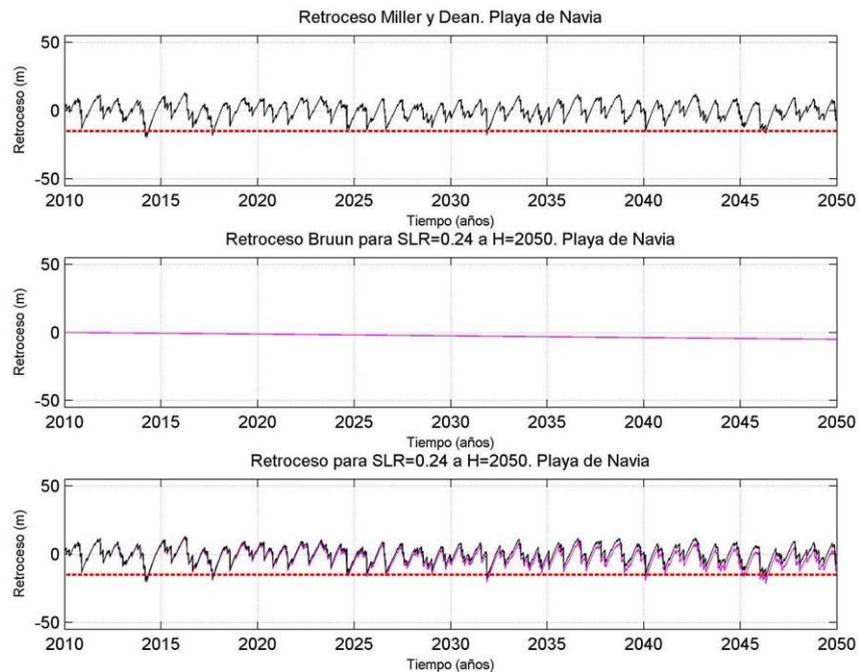


Figura 4.45. Primera aproximación: serie de erosión-acreción con efecto agregado del retroceso de Bruun para un aumento del nivel medio del mar de 24 cm en la playa de Navia.

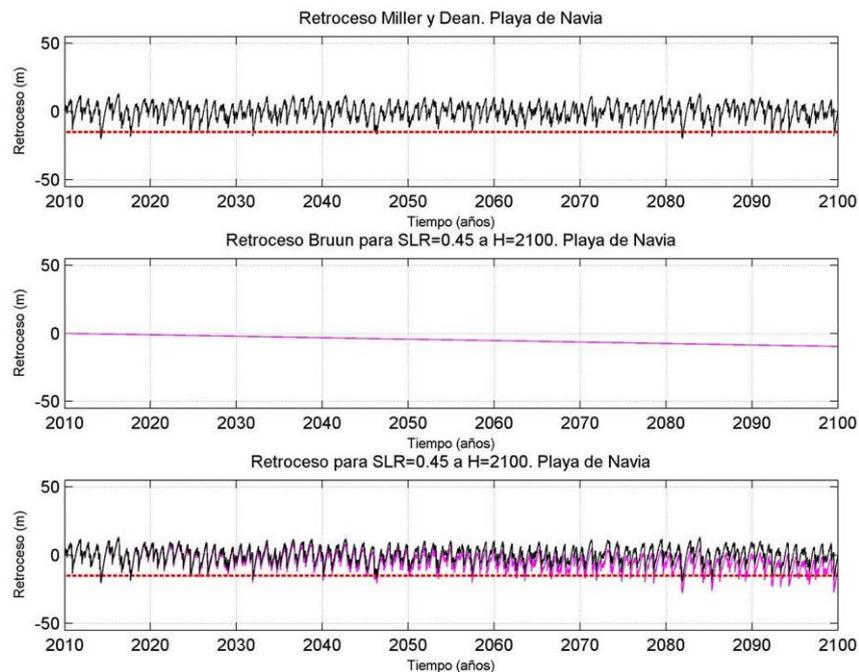


Figura 4.46. Primera aproximación: serie de erosión-acreción con efecto agregado del retroceso de Bruun para un aumento del nivel medio del mar de 45 cm en la playa de Navia.

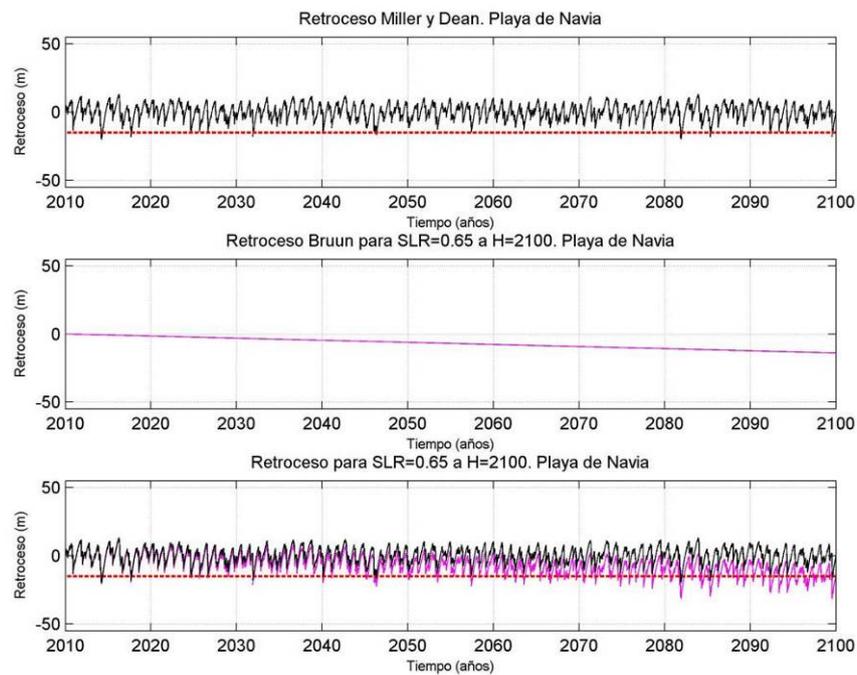


Figura 4.47. Primera aproximación: serie de erosión-acreción con efecto agregado del retroceso de Bruun para un aumento del nivel medio del mar de 65 cm en la playa de Navia.

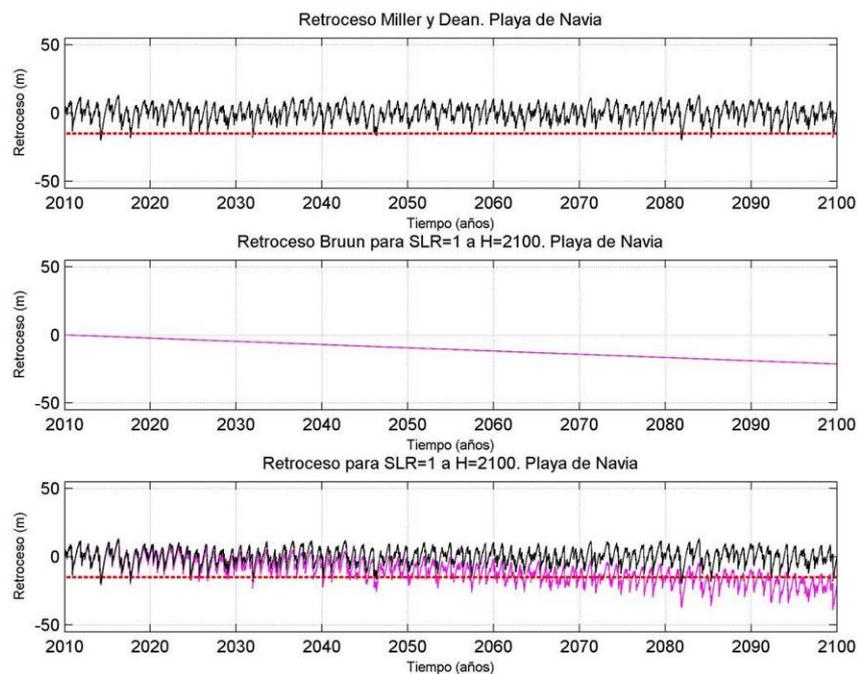


Figura 4.48. Primera aproximación: serie de erosión-acreción con efecto agregado del retroceso de Bruun para un aumento del nivel medio del mar de 65 cm en la playa de Navia.

Se puede observar cómo con el incremento de 1 metro del nivel medio del mar se puede llegar a un retranqueo de la línea de costa de casi 40 metros.

El hecho de no incluir el aumento del nivel medio del mar obtenido con el modelo de Bruun como un valor constante a la serie temporal de Miller y Dean se debe a que, en ese caso, se estaría desplazando la curva pero se asumiría que la distribución de extremos sería la misma, lo cual no es cierto. La figura 4.49 muestra los regímenes extremales obtenidos para cada escenario.

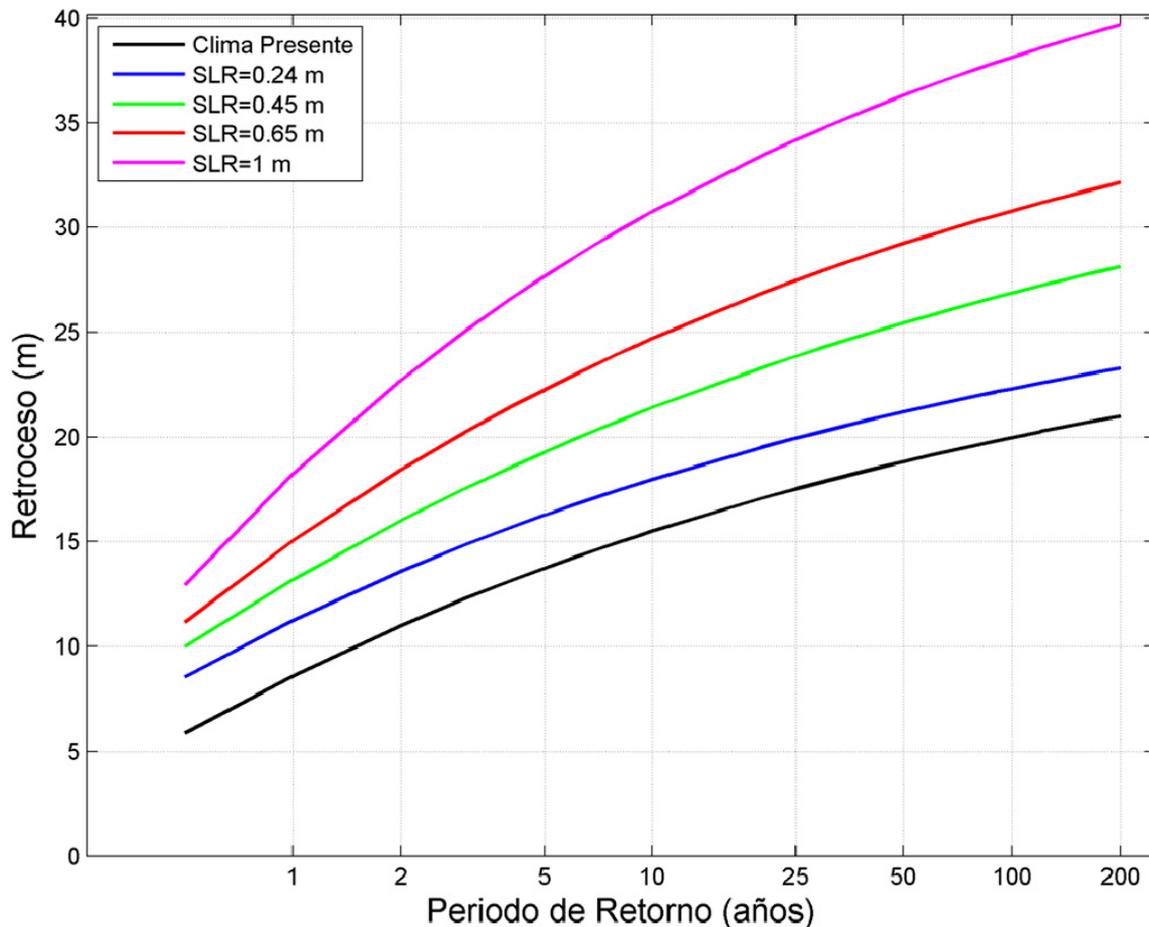


Figura 4.49. Primera aproximación: comparación de los regímenes extremales en la playa de Navia.

Las figuras 4.50, 4.51, 4.52 y 4.53 describen las series de acreción-erosión con el efecto agregado del aumento del nivel medio del mar como otro nivel (segunda aproximación) obtenidas con la formulación de Miller y Dean para los distintos escenarios climáticos considerados.

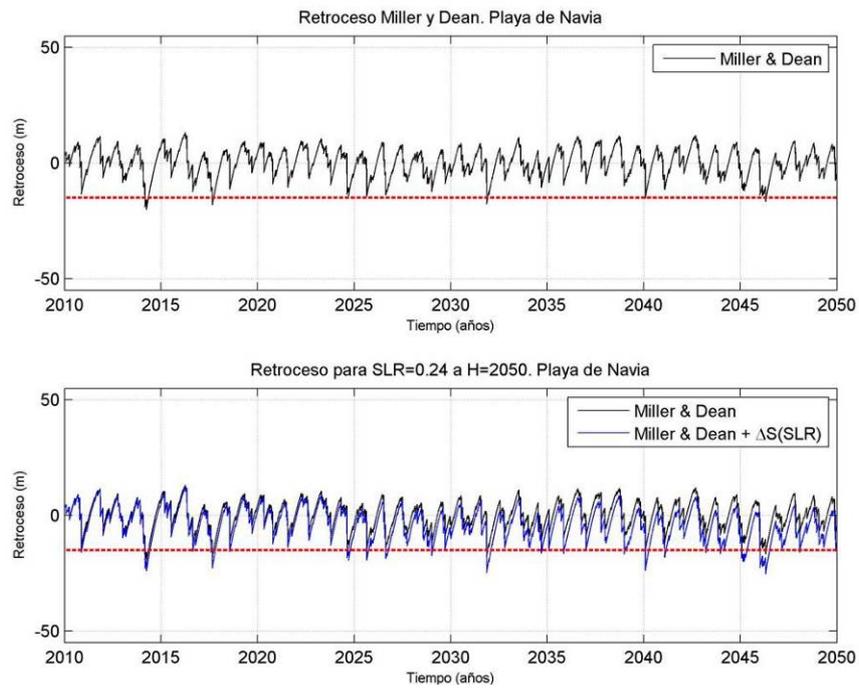


Figura 4.50. Segunda aproximación: serie de erosión-acreción con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m incluido en el término ΔY_{eq} como un nivel más, en la playa de Navia.

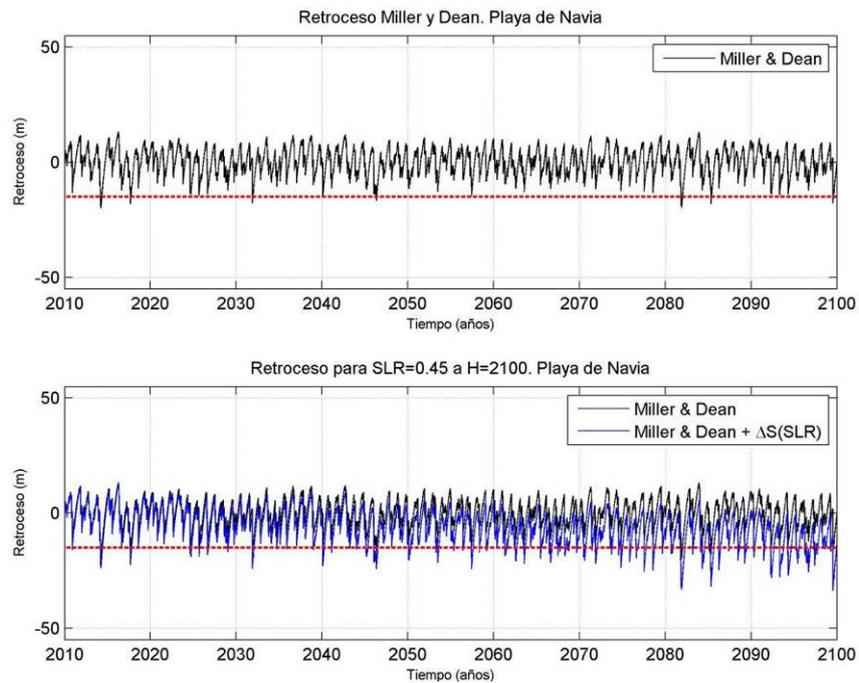


Figura 4.51. Segunda aproximación: serie de erosión-acreción con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m incluido en el término ΔY_{eq} como un nivel más, en la playa de Navia.

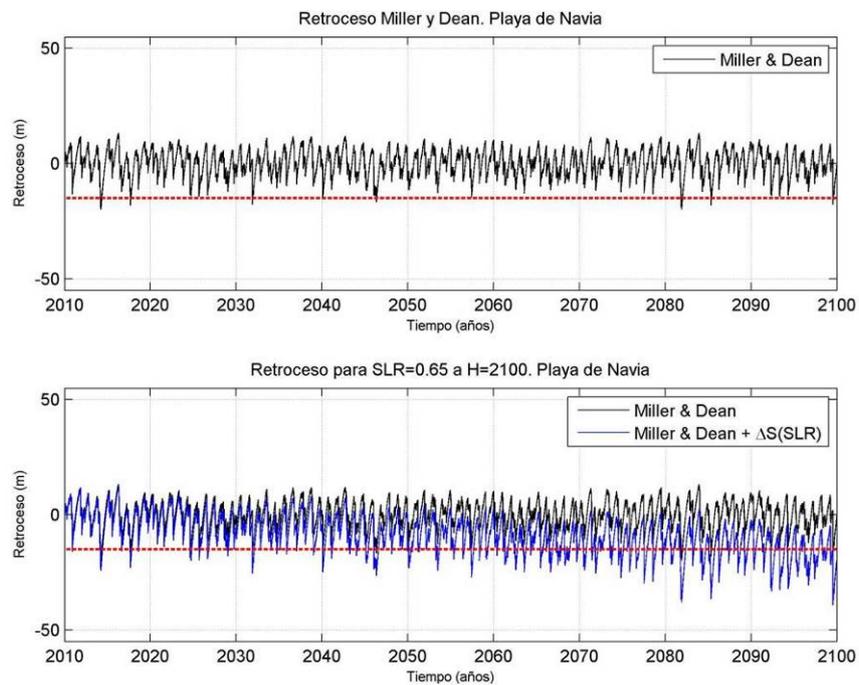


Figura 4.52. Segunda aproximación: serie de erosión-acreción con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m incluido en el término ΔY_{eq} como un nivel más, en la playa de Navia.

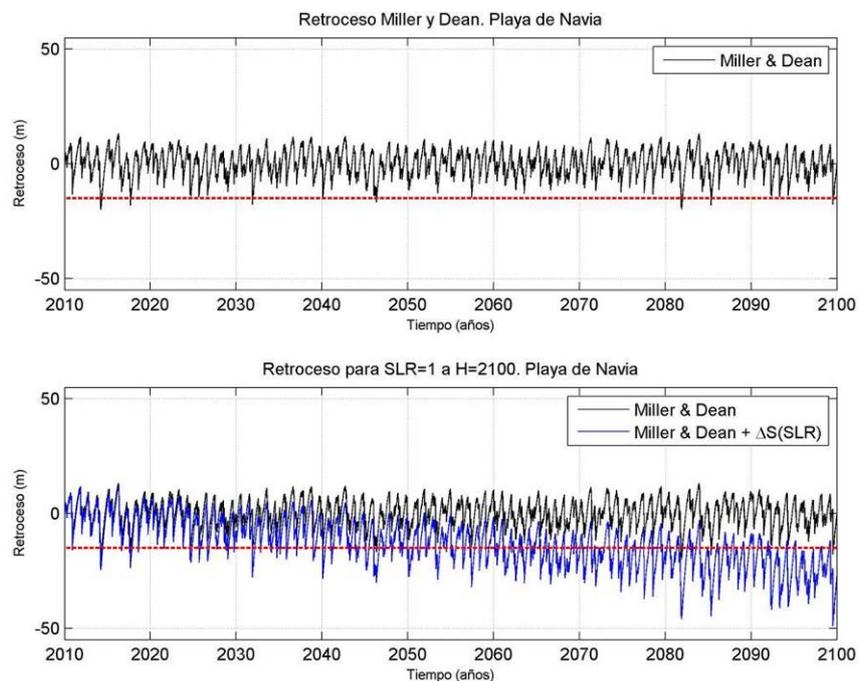


Figura 4.53. Segunda aproximación: serie de erosión-acreción con un aumento del nivel medio del mar de 1 m incluido en el término ΔY_{eq} como un nivel más, en la playa de Navia.

Los resultados siguen un patrón similar a los obtenidos con la primera aproximación. Los escenarios de aumento del nivel medio del mar de 0.24 y 0.45 m proporcionan valores de retroceso y recuperación de la línea de costa muy parecidos siendo el primero algo más pesimista. Con incrementos de nivel de 0.65 y 1 m a 2100 se alcanzan erosiones en torno a 30 y 40 metros respectivamente.

A continuación, se muestra la comparación de los regímenes extremales obtenidos para cada escenario de aumento del nivel medio del mar (véase la figura 4.54).

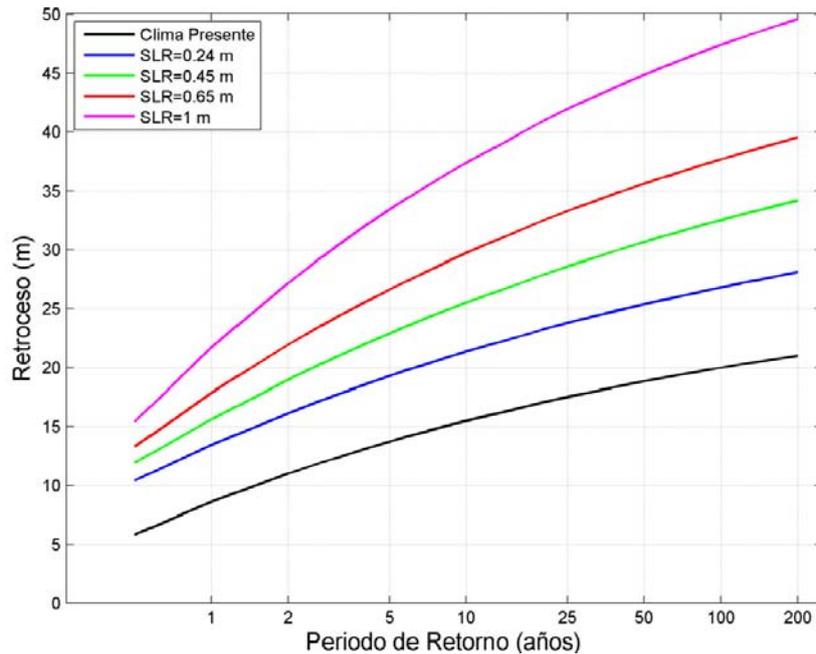


Figura 4.54. Segunda aproximación: comparación de los regímenes extremales en la playa de Navia.

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos con la tercera aproximación propuesta. Las figuras describen la reconstrucción de la serie de Miller y Dean con el aumento del nivel medio del mar, traducido a retroceso de línea de costa con el modelo de Bruun, e implementado en el término ΔY_0 para los cuatro escenarios de cambio climático planteados (véanse las figuras 4.55, 4.56, 4.57 y 4.58).

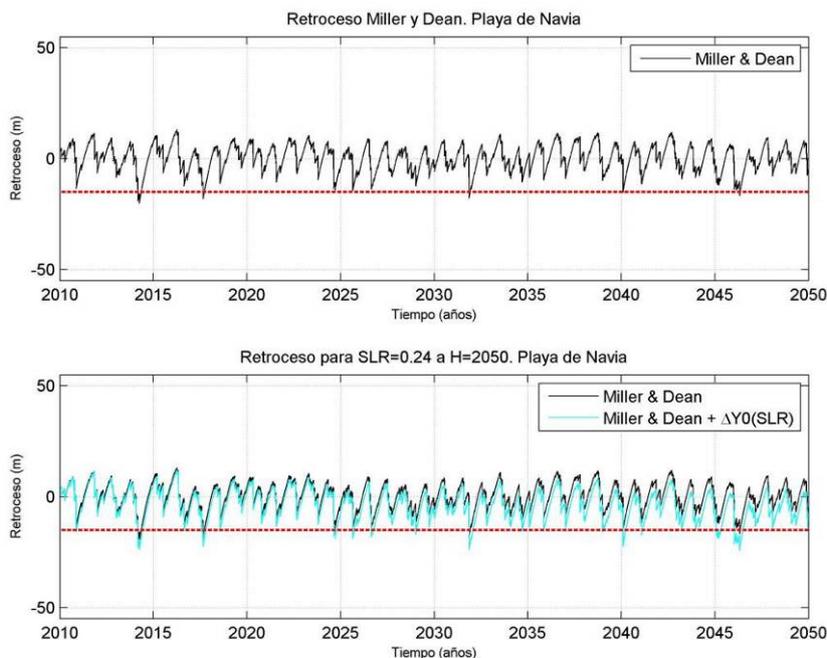


Figura 4.55. Tercera aproximación: serie de erosión-acreción con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m incluido en el término ΔY_0 , en la playa de Navia.

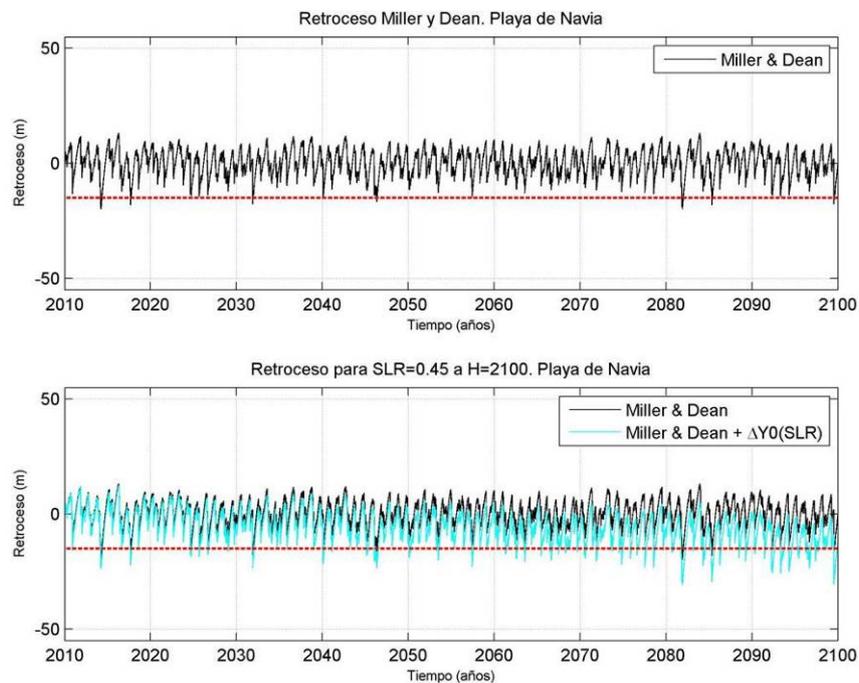


Figura 4.56. Tercera aproximación: serie de erosión-acreción con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m incluido en el término ΔY_0 , en la playa de Navia.

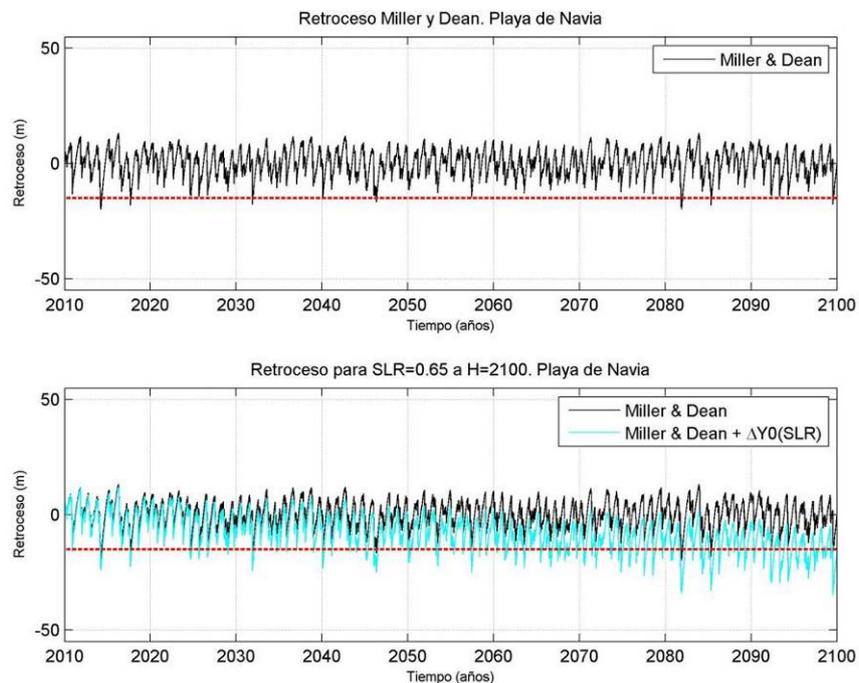


Figura 4.57. Tercera aproximación: serie de erosión-acreción con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m incluido en el término ΔY_0 , en la playa de Navia.

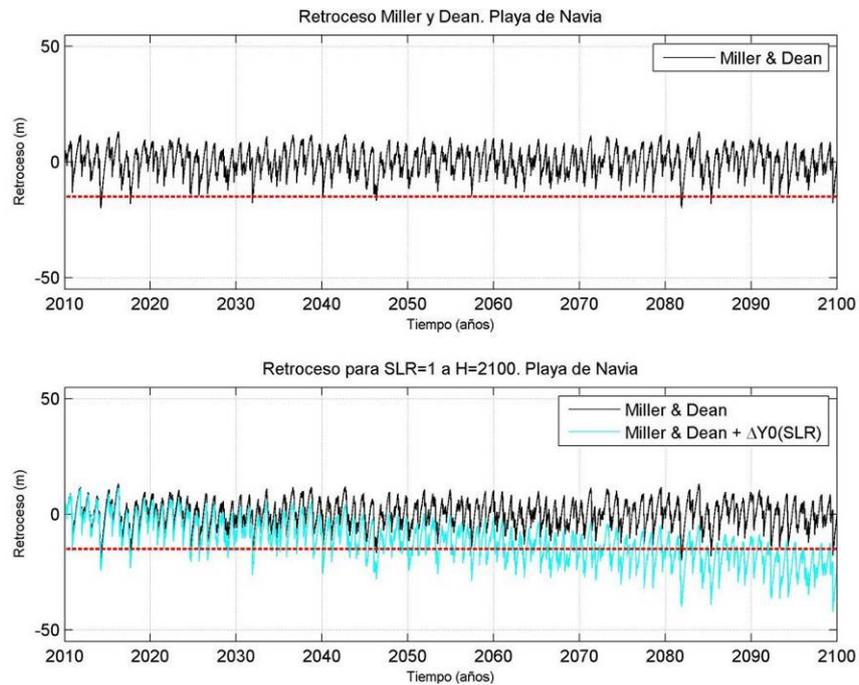


Figura 4.58. Tercera aproximación: serie de erosión-acreción con un aumento del nivel medio del mar de 1 m incluido en el término ΔY_0 , en la playa de Navia.

Los resultados no difieren demasiado de la anterior aproximación descrita siguiendo la misma tendencia y alcanzando valores máximos muy parecidos para cada escenario: ligeramente menores en erosiones máximas y mayores en recuperaciones.

Análogamente a lo expuesto para el análisis de las anteriores aproximaciones, la figura 4.59 muestra los distintos regímenes extremales obtenidos para cada escenario.

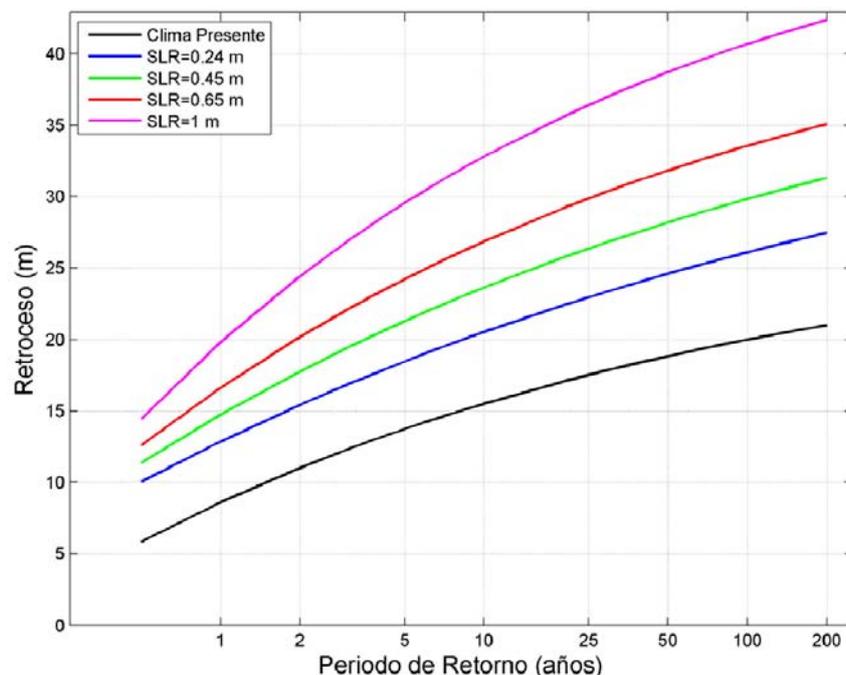


Figura 4.59. Tercera aproximación: comparación de los regímenes extremales en la playa de Navia.

La primera aproximación considerada es la más simple de implementar y, a la vez, la que peor reproduciría la evolución de la línea costa pues el hecho de simular cada proceso de forma independiente no permite que el modelo de Miller y Dean tenga en cuenta la contribución del aumento del nivel medio del mar en cada instante. Por el contrario, las otras dos aproximaciones propuestas sí tienen en consideración los cambios en el aumento del nivel del mar en cada instante y, dada la similitud en resultados de ambas, se ha decidido obtener el retroceso medio de cada playa, además de otros parámetros estadísticos relevantes, de acuerdo al modelo que incluye el aumento de nivel en el término ΔY_{eq} , por proporcionar erosiones ligeramente más desfavorables y así estar del lado de la seguridad. A continuación se muestran, para cada escenario de aumento del nivel medio del mar, los resultados asociados al régimen medio para cada una de las playas: el retroceso medio de la línea de costa y el retroceso asociado al percentil del 95% (véanse figuras 4.60, 4.61, 4.62 y 4.63).

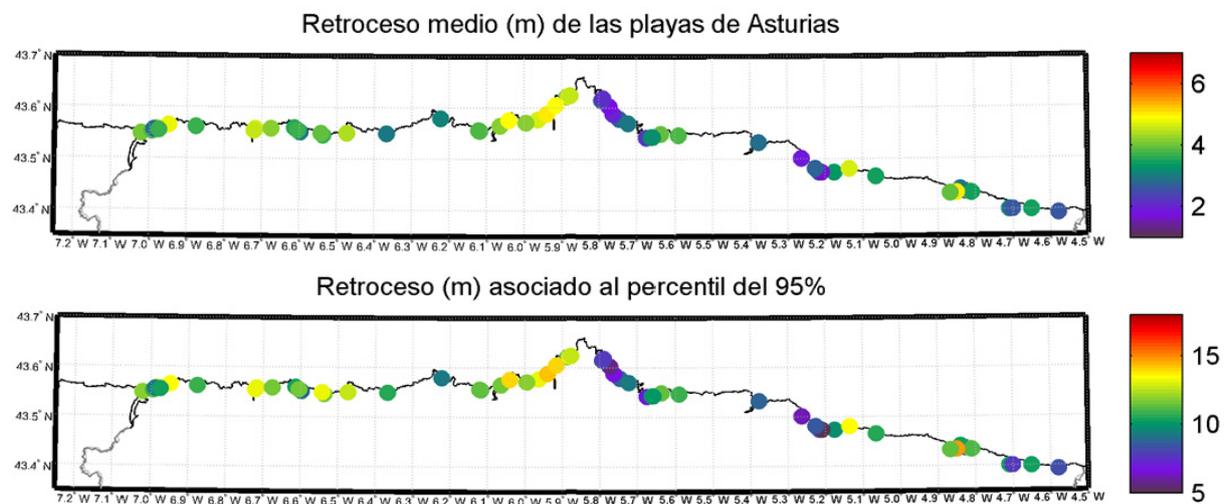


Figura 4.60. Distribución espacial del retroceso medio y del retroceso asociado al percentil de 95% de las playas del litoral asturiano considerando efectos de corto plazo y un aumento del nivel medio del mar de 24 cm a 2050.

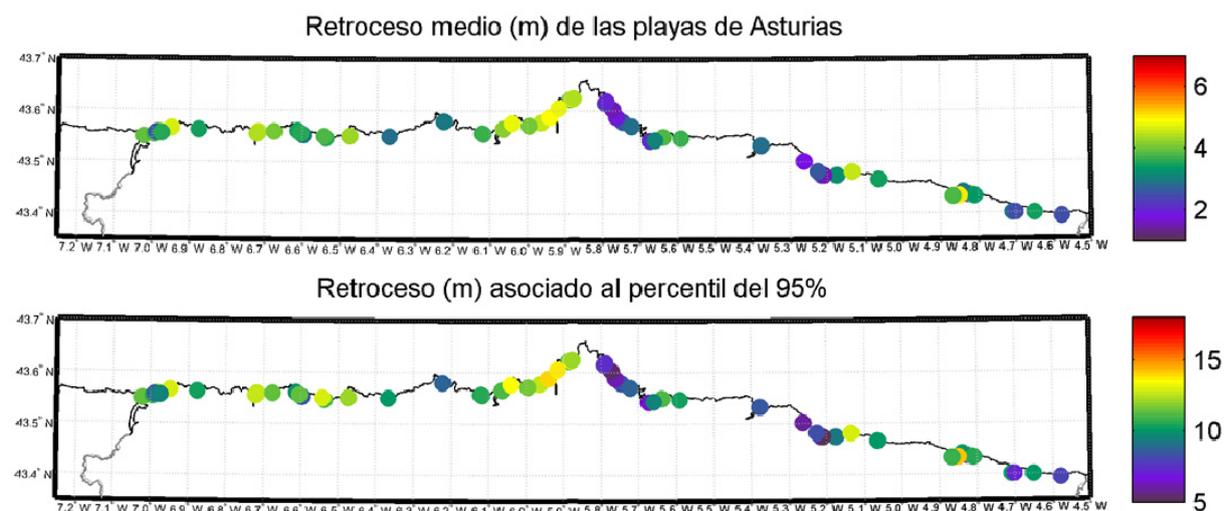


Figura 4.61. Distribución espacial del retroceso medio y del retroceso asociado al percentil de 95% de las playas del litoral asturiano considerando efectos de corto plazo y un aumento del nivel medio del mar de 45 cm a 2100.

Tal y como se puede observar en las figuras anteriores, para el escenario de aumento del nivel del mar de 0.24 m, las playas de San Juan y de Torimbia superarán los 5 m de retroceso medio de la línea de costa. Ligeramente por debajo, las playas de El Moro, Navia, La Grande, Salinas, Carriciega, Tenrero, Xagó y Vega erosionarán su línea de costa en torno a 4.5 m respecto a su posición actual. El escenario del aumento de nivel de 0.45 m arroja resultados muy similares aunque ninguna playa supera los 5 m de pérdida de playa seca. Por otra parte, las playas menos afectadas son las El Viso, La Griega, San Pedro de Antomero y La Palmera con retrocesos menores a 2 m.

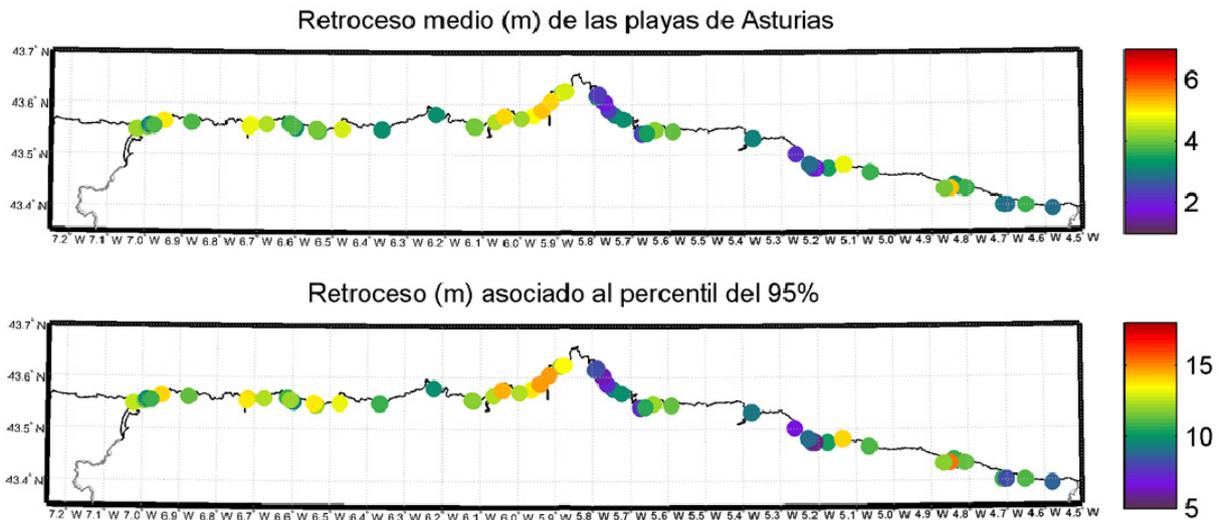


Figura 4.62. Distribución espacial del retroceso medio y del retroceso asociado al percentil de 95% de las playas del litoral asturiano considerando efectos de corto plazo y un aumento del nivel medio del mar de 65 cm a 2100.

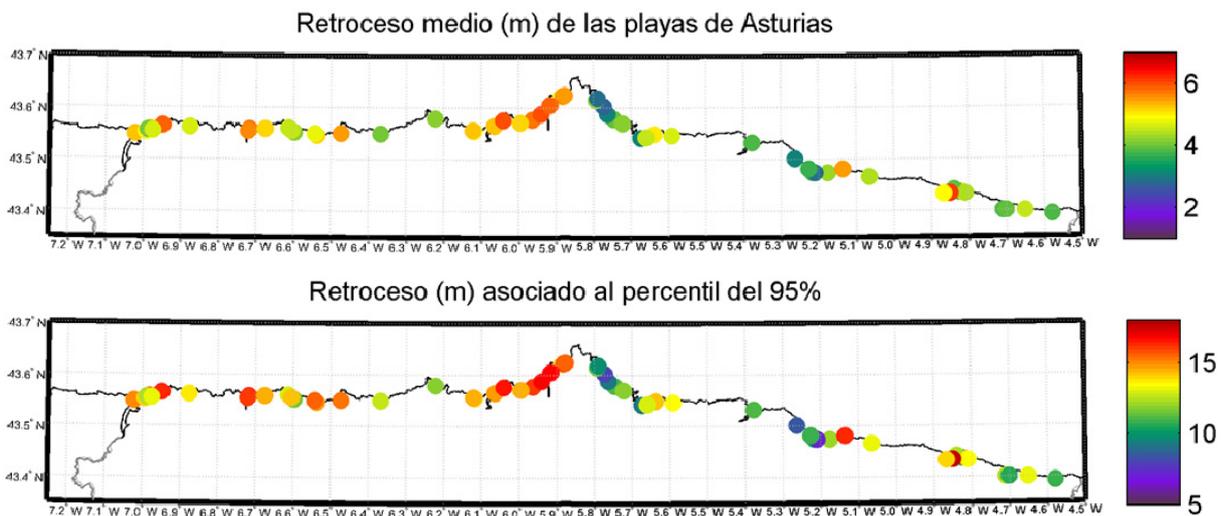


Figura 4.63. Distribución espacial del retroceso medio y del retroceso asociado al percentil de 95% de las playas del litoral asturiano considerando efectos de corto plazo y un aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100.

Los escenarios de aumento del nivel medio del mar de 0.65 y 1 m conllevan erosiones de mayor magnitud. Para el primero de ellos, el Playón de Bayas y las playas de San Juan, Xagó y Torimbia alcanzarán los 5 m de retroceso de línea de costa y, con un incremento de nivel de 1 m, San Juan y Torimbia superarán los 6 metros de pérdida de playa seca.

Las figuras 4.64 - 4.79 describen el régimen extremal de retroceso de la línea de costa de las playas del litoral del Principado de Asturias. Para cada escenario de aumento del nivel medio del mar propuesto se ha obtenido el retroceso de 5, 10, 25 y 50 años de periodo de retorno. Además, se muestran los indicadores de erosión asociados que relacionan el retroceso esperado con el ancho de playa medio.

En primer lugar, se muestran los resultados de los diferentes cuantiles de retroceso seleccionados para un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m en el año horizonte 2050 (véanse las figuras 4.64, 4.65, 4.66 y 4.67).

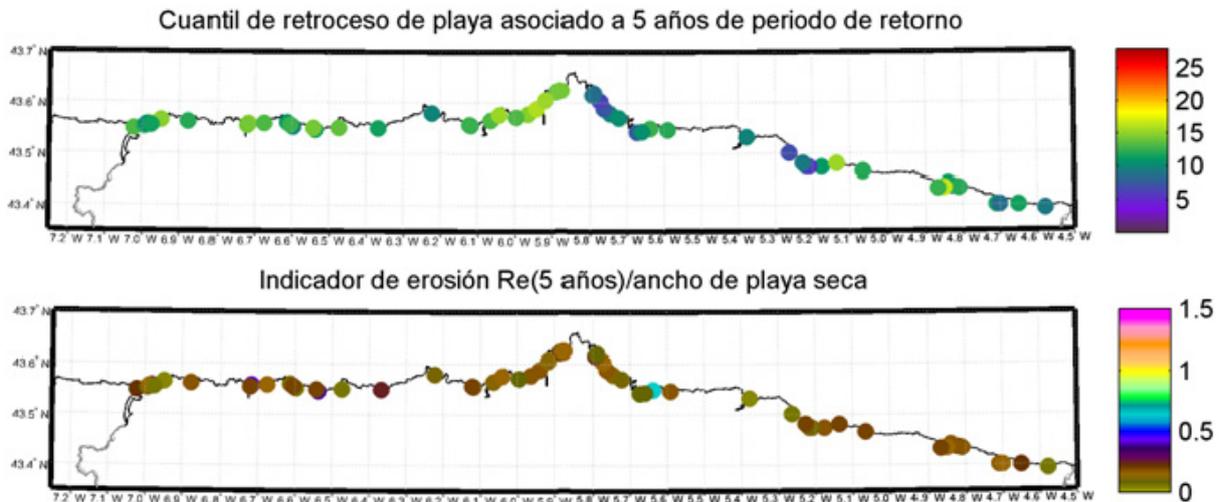


Figura 4.64. Distribución espacial del retroceso asociado al periodo de retorno de 5 años y del indicador asociado al mismo en las playas de Asturias para un aumento del nivel medio del mar de 24 cm a 2050.

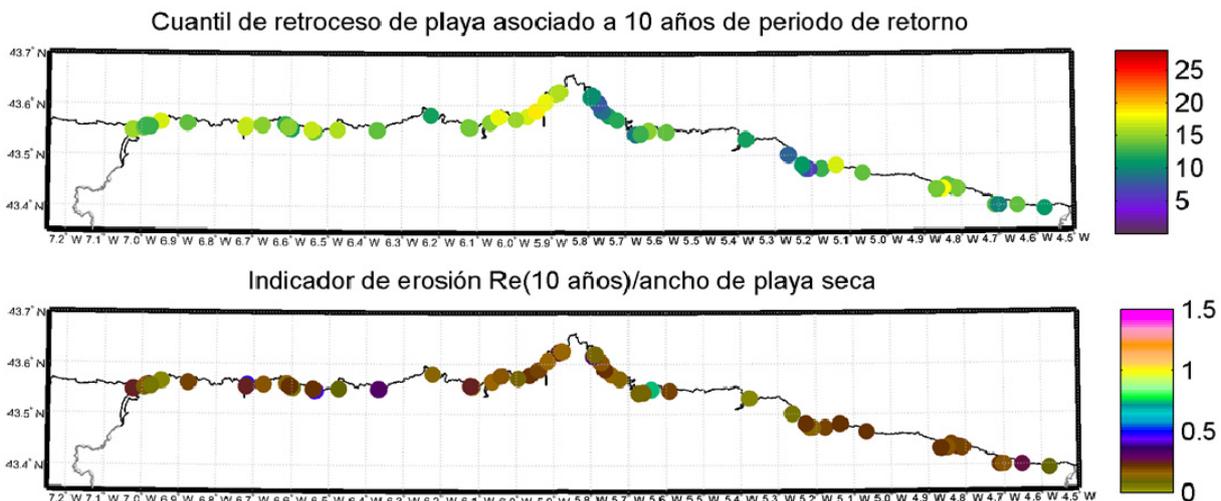


Figura 4.65. Distribución espacial del retroceso asociado al periodo de retorno de 10 años y del indicador asociado al mismo en las playas de Asturias para un aumento del nivel medio del mar de 24 cm a 2050.

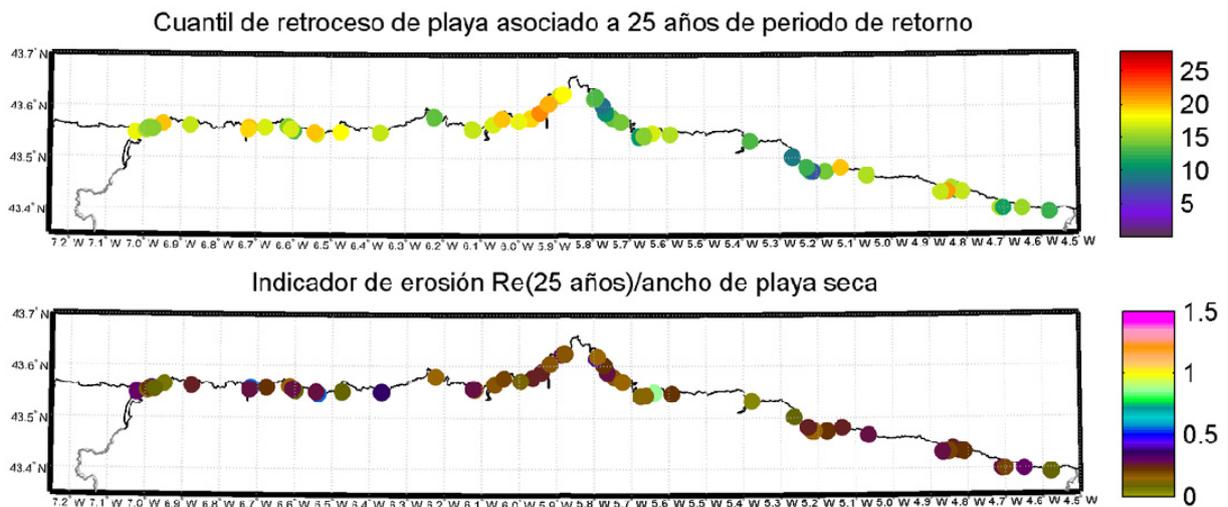


Figura 4.66. Distribución espacial del retroceso asociado al periodo de retorno de 25 años y del indicador asociado al mismo en las playas de Asturias para un aumento del nivel medio del mar de 24 cm a 2050.

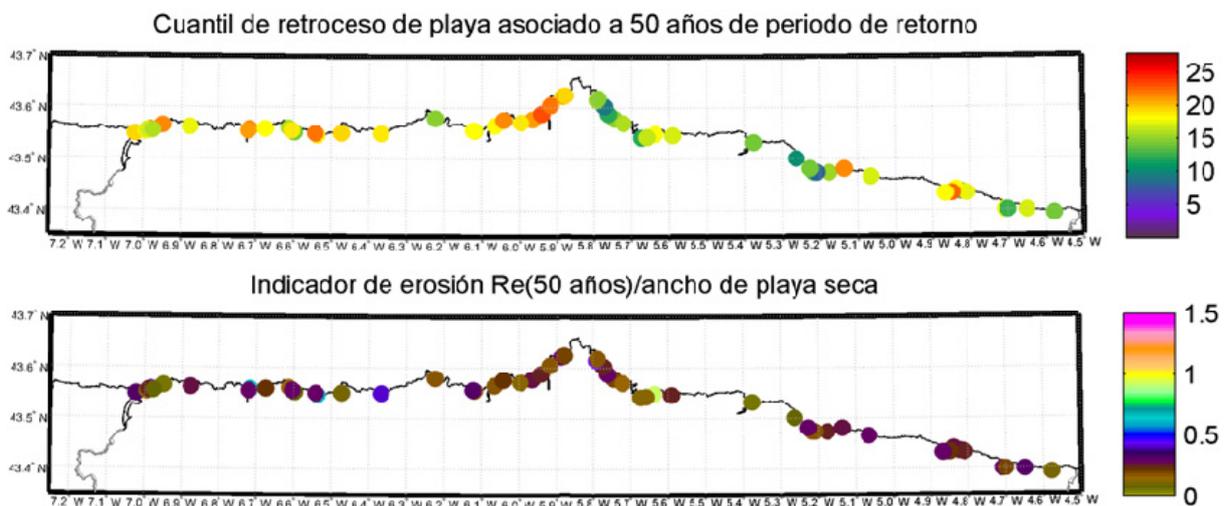


Figura 4.67. Distribución espacial del retroceso asociado al periodo de retorno de 50 años y del indicador asociado al mismo en las playas de Asturias para un aumento del nivel medio del mar de 24 cm a 2050.

Como se puede observar en la figura 4.64 y asumiendo un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a mitad de siglo, algunas playas como el Playón de Bayas, San Juan, Carriciega, Xagó, Vega y Torimbia superarán los 15 m de retroceso de línea de costa con un retorno de 5 años. Si se observa el retroceso asociado a 10 años de periodo de retorno (véase la figura 4.65), las playas mencionadas superarán los 17 m de pérdida de playa seca y a la lista se sumarán las de El Moro y Salinas. La playa de San Juan alcanzará los 21 m de erosión con un periodo de retorno de 25 años (véase la figura 4.66) y los 23 m cada 50 años (véase figura 4.67). Además, para el periodo de retorno de 50 años, otras playas como Salinas, El Viso, Xagó y Torimbia sufrirán retrocesos de hasta 22 m.

Sin embargo, los metros de retroceso de línea de costa no son significativos si no se establece una relación entre estos y la anchura de playa seca para cada una de las playas pues es esta relación las que nos indica realmente si la playa se está perdiendo. Analizando los paneles inferiores de las figuras 4.64-4.67, se puede extraer las playas con valores del indicador de erosión más elevados para los distintos periodos de retorno son las de Luarca, El Moro y Cervigón que, para 5 años de periodo de retorno alcanzan valores de 0.39, 0.42 y 0.63 m, superando ésta última el valor de 0.8 con 25 años de periodo de retorno, un umbral crítico que indica que la situación es altamente preocupante y que se debe actuar si no se quiere perder la playa seca.

Las siguientes figuras 4.68-4.71 muestran los resultados para 5, 10, 25 y 50 años de periodo de retorno y un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a final de siglo.

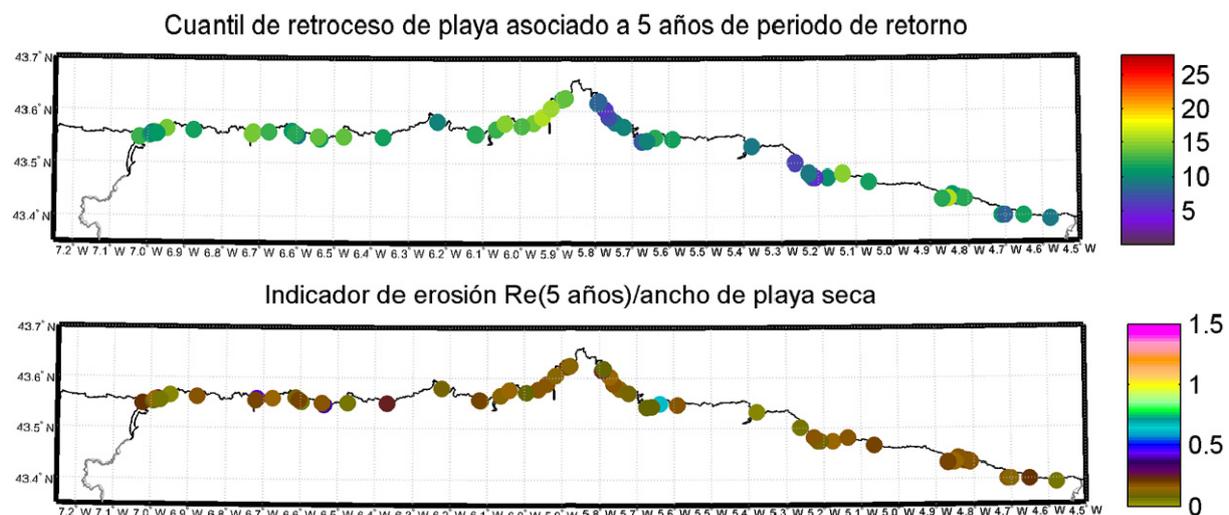


Figura 4.68. Distribución espacial del retroceso asociado al periodo de retorno de 5 años y del indicador asociado al mismo en las playas de Asturias para un aumento del nivel medio del mar de 45 cm a 2100.

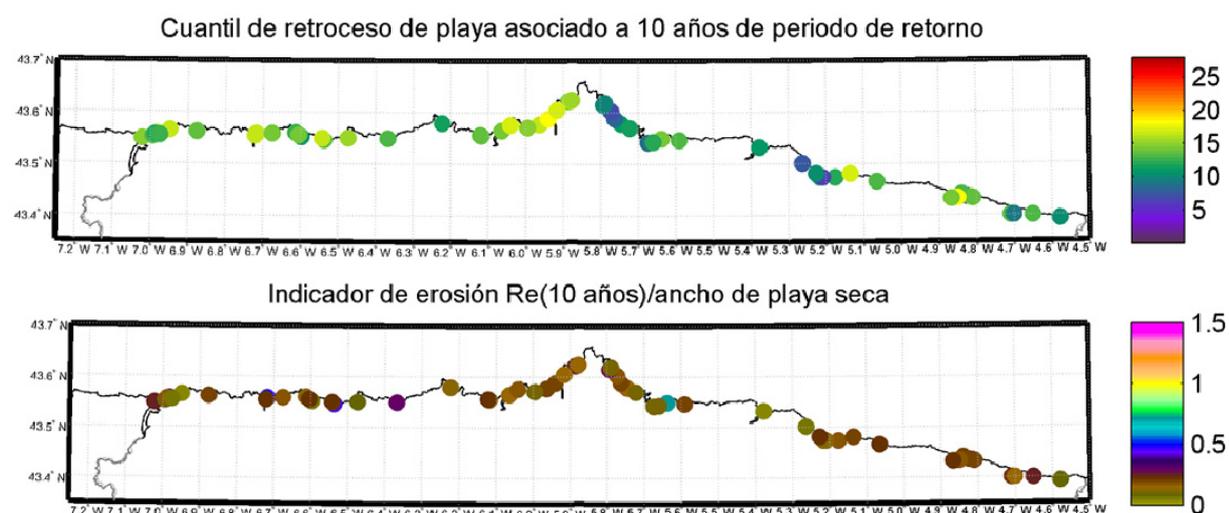


Figura 4.69. Distribución espacial del retroceso asociado al periodo de retorno de 10 años y del indicador asociado al mismo en las playas de Asturias para un aumento del nivel medio del mar de 45 cm a 2100.

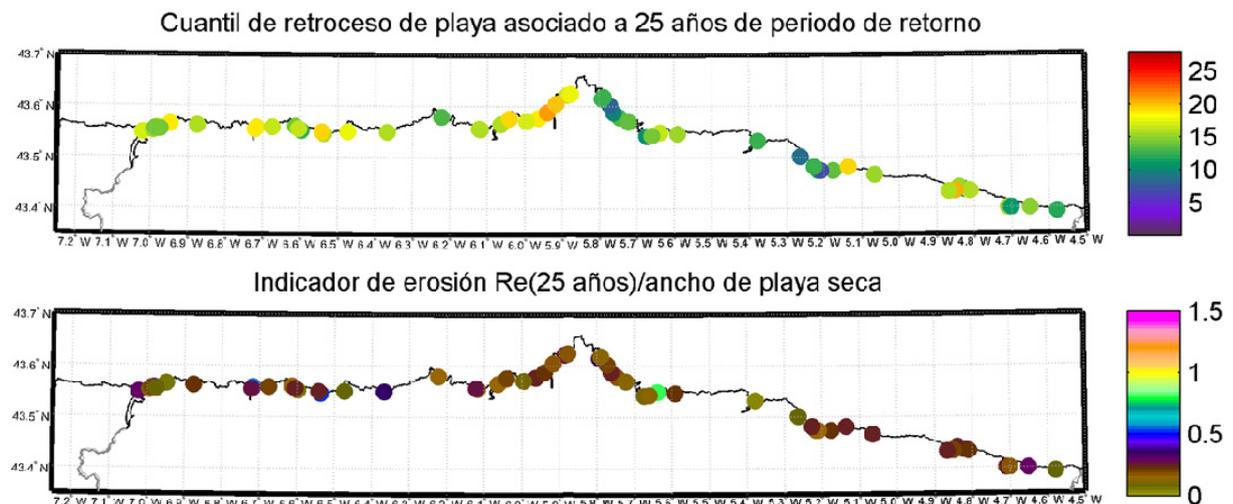


Figura 4.70. Distribución espacial del retroceso asociado al periodo de retorno de 25 años y del indicador asociado al mismo en las playas de Asturias para un aumento del nivel medio del mar de 45 cm a 2100.

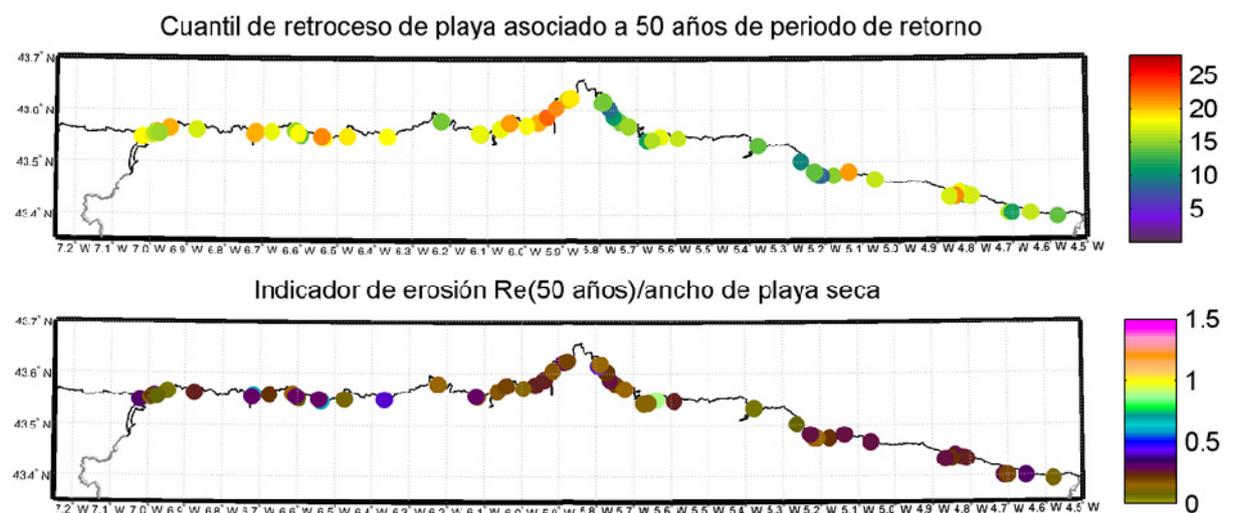


Figura 4.71. Distribución espacial del retroceso asociado al periodo de retorno de 50 años y del indicador asociado al mismo en las playas de Asturias para un aumento del nivel medio del mar de 45 cm a 2100.

En base a los resultados observados, las conclusiones que pueden extraerse son similares a las expuestas para el escenario de incremento del nivel del mar de 0.24 m a 2050: los retrocesos que muestran las figuras son ligeramente inferiores pero los valores que asumen los indicadores de erosión se mantienen en el mismo rango.

A continuación, las figuras 4.72-4.75 describen el régimen extremal de erosión de playa para los mismos periodos de retorno pero considerando un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m en el año 2100.

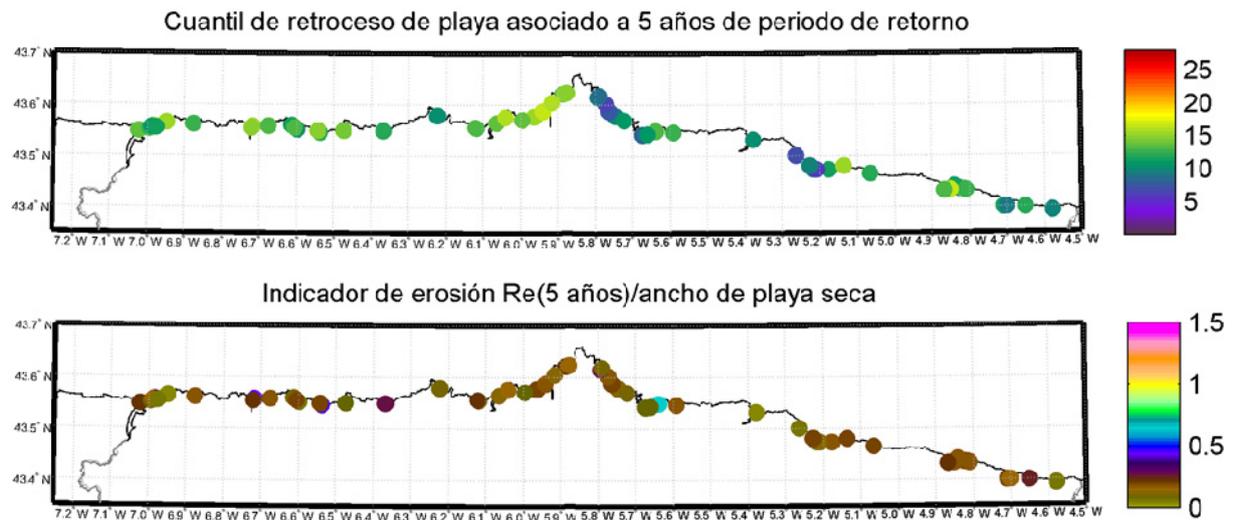


Figura 4.72. Distribución espacial del retroceso asociado al periodo de retorno de 5 años y del indicador asociado al mismo en las playas de Asturias para un aumento del nivel medio del mar de 65 cm a 2100.

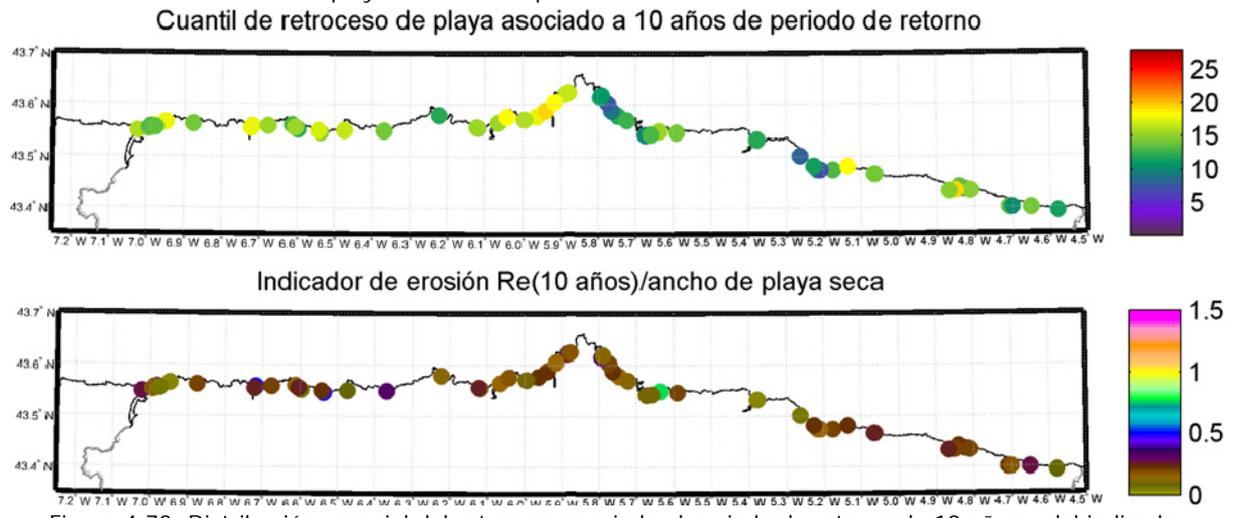


Figura 4.73. Distribución espacial del retroceso asociado al periodo de retorno de 10 años y del indicador asociado al mismo en las playas de Asturias para un aumento del nivel medio del mar de 65 cm a 2100.

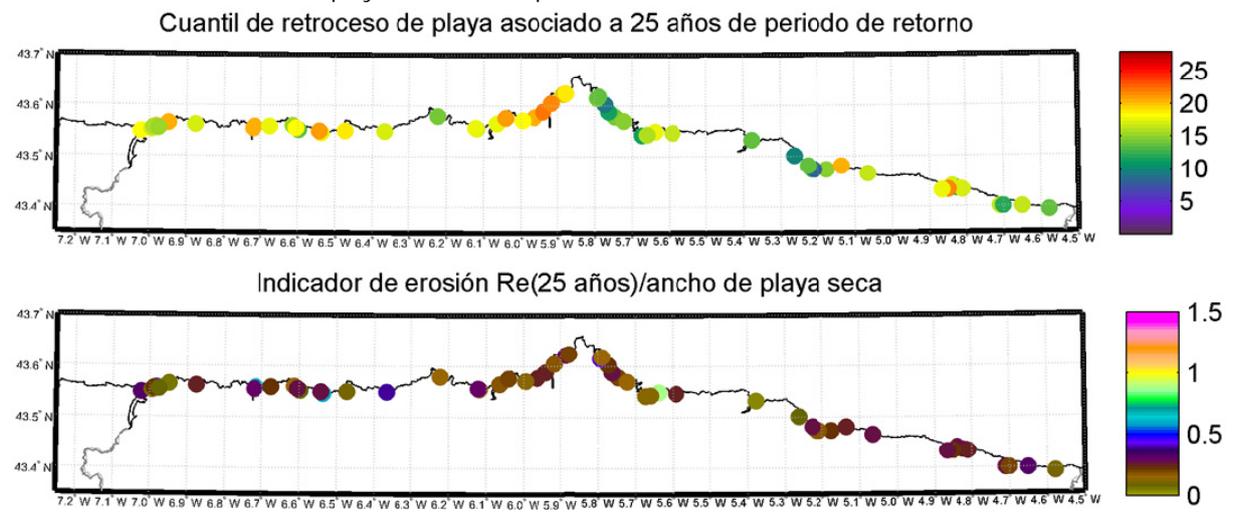


Figura 4.74. Distribución espacial del retroceso asociado al periodo de retorno de 25 años y del indicador asociado al mismo en las playas de Asturias para un aumento del nivel medio del mar de 65 cm a 2100.

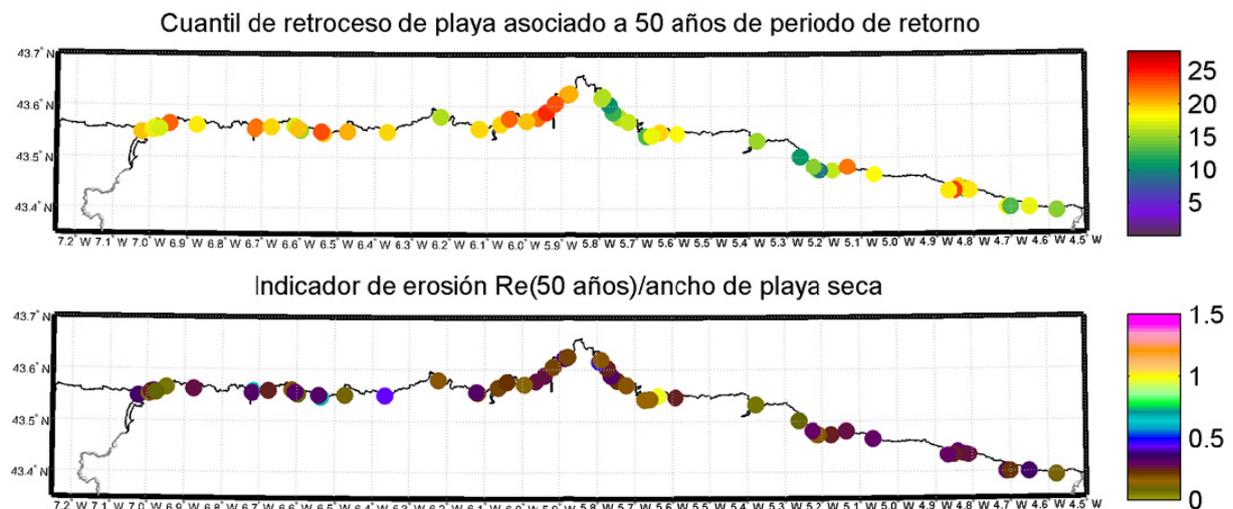


Figura 4.75. Distribución espacial del retroceso asociado al periodo de retorno de 50 años y del indicador asociado al mismo en las playas de Asturias para un aumento del nivel medio del mar de 65 cm a 2100.

Los cuantiles de los retrocesos obtenidos para los distintos periodos de retorno tienen valores más elevados pero siguen un patrón similar a los anteriores escenarios analizados, superando la erosión de 50 años de periodo de retorno los 24 m en la playa de San Juan. Las playas de Salinas, Xagó y Torimbia perderán hasta 23 m de playa seca.

En cuanto a los indicadores de erosión, para los periodos de retorno de 5 y 10 años, los cambios respecto a los de los escenarios de 0.24 y 0.45 m de aumento del nivel medio del mar, a 2050 y a 2100 respectivamente, son poco apreciables. Sin embargo, para los periodos de retorno más elevados, como es el caso de 50 años, el valor de estos indicadores aumentará llegando la playa de El Moro a 0.65, Luarca a 0.7 y Cervigón a 0.97. Para ese mismo periodo de retorno, las playas de La Ribera y Cadavedo superarán el valor de 0.4.

Finalmente, se muestran los cuantiles de retroceso de las playas del Principado de Asturias asociados a 5, 10, 25 y 50 años de periodo de retorno considerando, además de los efectos de corto plazo, un aumento del nivel medio del mar de 1 m.

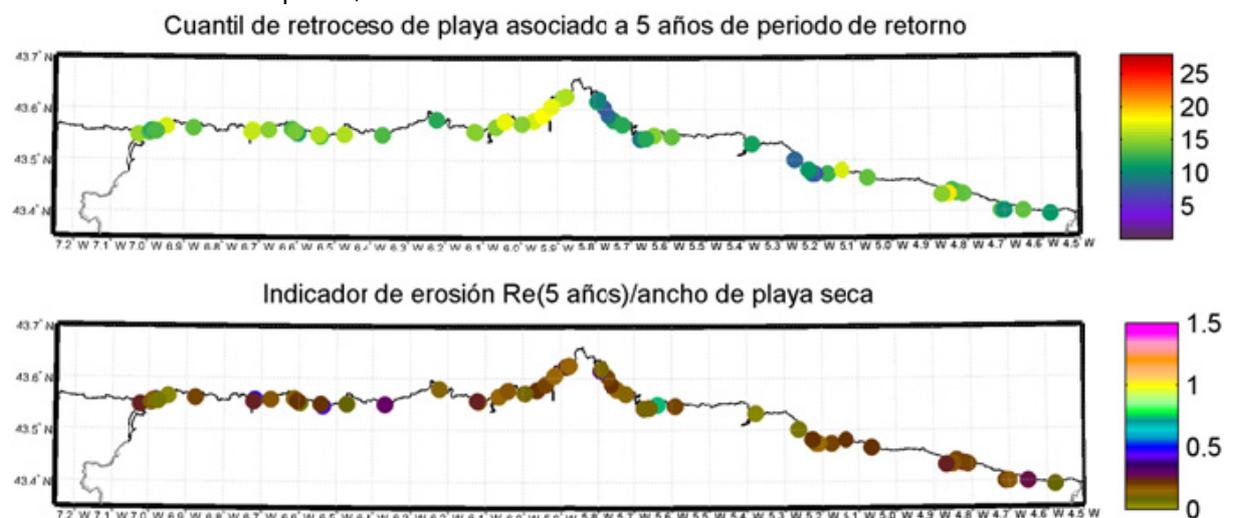


Figura 4.76. Distribución espacial del retroceso asociado al periodo de retorno de 5 años y del indicador asociado al mismo en las playas de Asturias para un aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100.

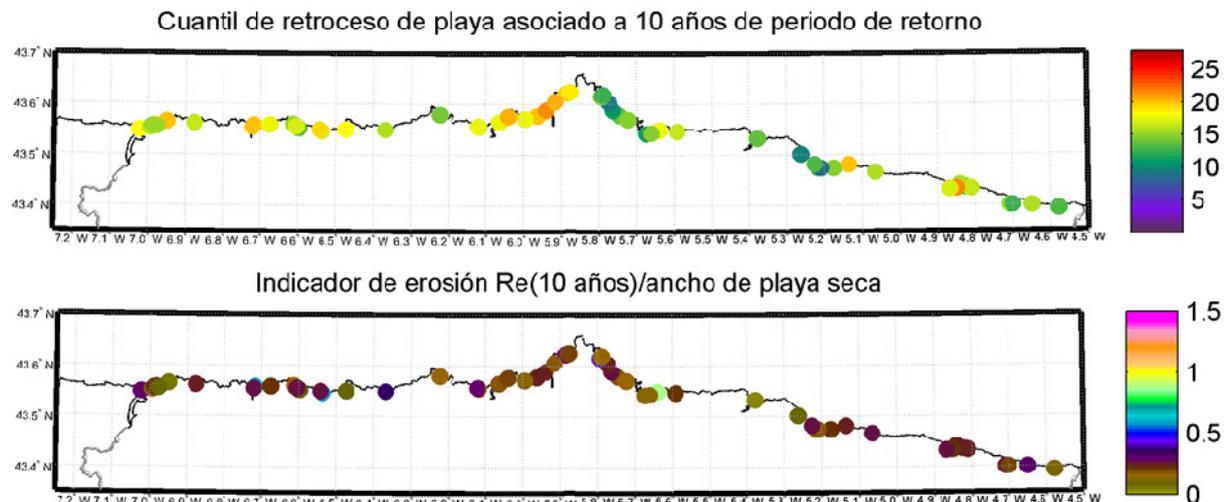


Figura 4.77. Distribución espacial del retroceso asociado al periodo de retorno de 10 años y del indicador asociado al mismo en las playas de Asturias para un aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100.

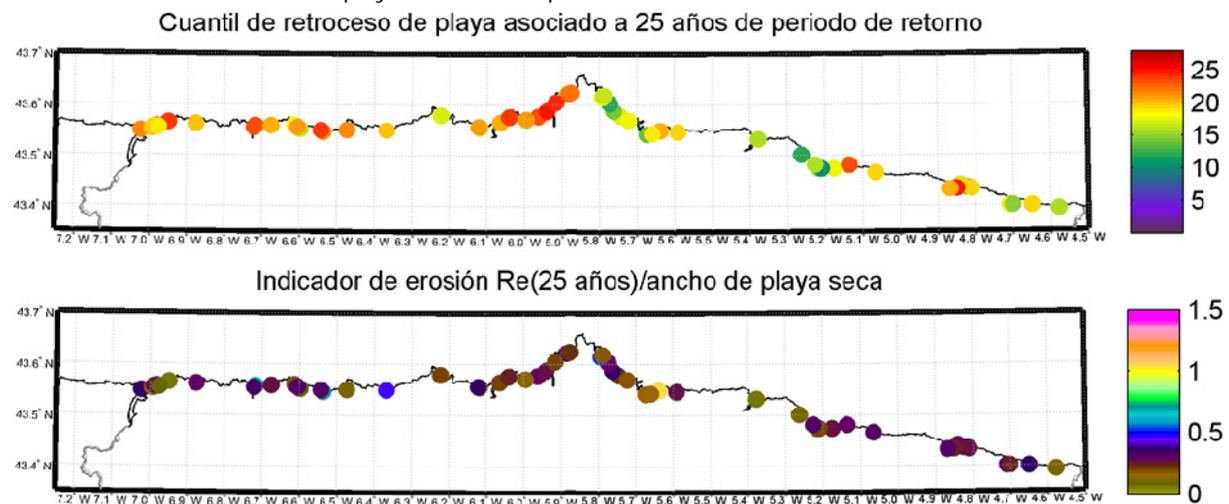


Figura 4.78. Distribución espacial del retroceso asociado al periodo de retorno de 25 años y del indicador asociado al mismo en las playas de Asturias para un aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100.

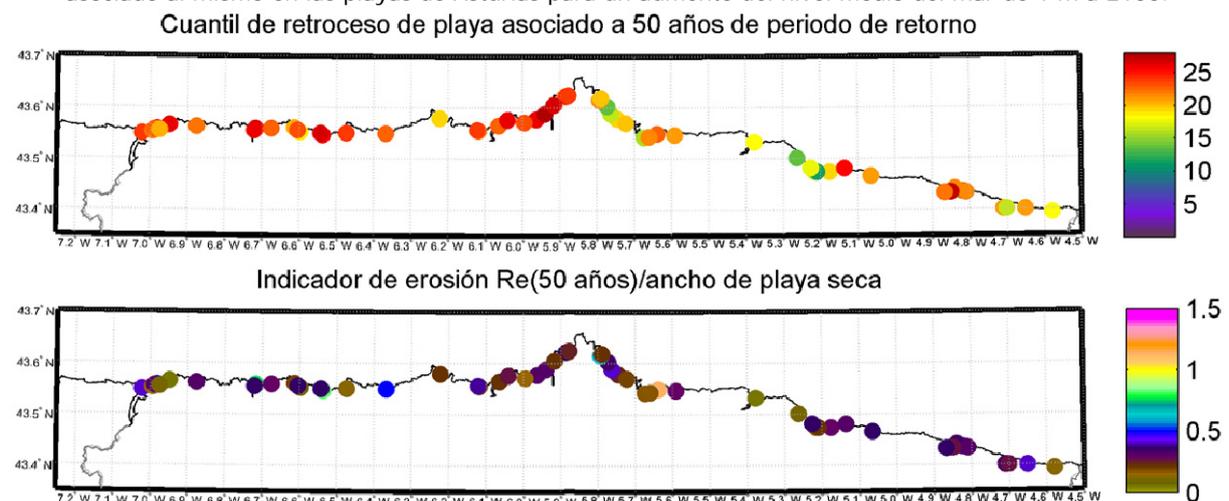


Figura 4.79. Distribución espacial del retroceso asociado al periodo de retorno de 50 años y del indicador asociado al mismo en las playas de Asturias para un aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100.

La erosión de 50 años de periodo de retorno para un aumento del nivel medio del mar de 1 m causará un retroceso mayor a 22 metros en 22 de las 57 playas de estudio, entre las que se encuentra San Lorenzo. El Moro, La Grande, Salinas y Xagó, perderán en ese caso más de 26 m de playa seca y las playas de San Juan y Torimbia retrocederán su línea de costa en torno a los 27 m.

Con respecto a los indicadores de erosión, las playas de Cadavedo y Mexota superarán el valor de 0.5 y La Ribera alcanzará el 0.6, para el retroceso de 50 años de periodo de retorno. Sin embargo, las playas más preocupantes son las de El Moro, Luarca y Cervigón que llegarán a valores del indicador de 0.75, 0.84 y 1.14, respectivamente, por lo que las dos primeras estarán en peligro de perder la playa y la última la habría perdido por completo.

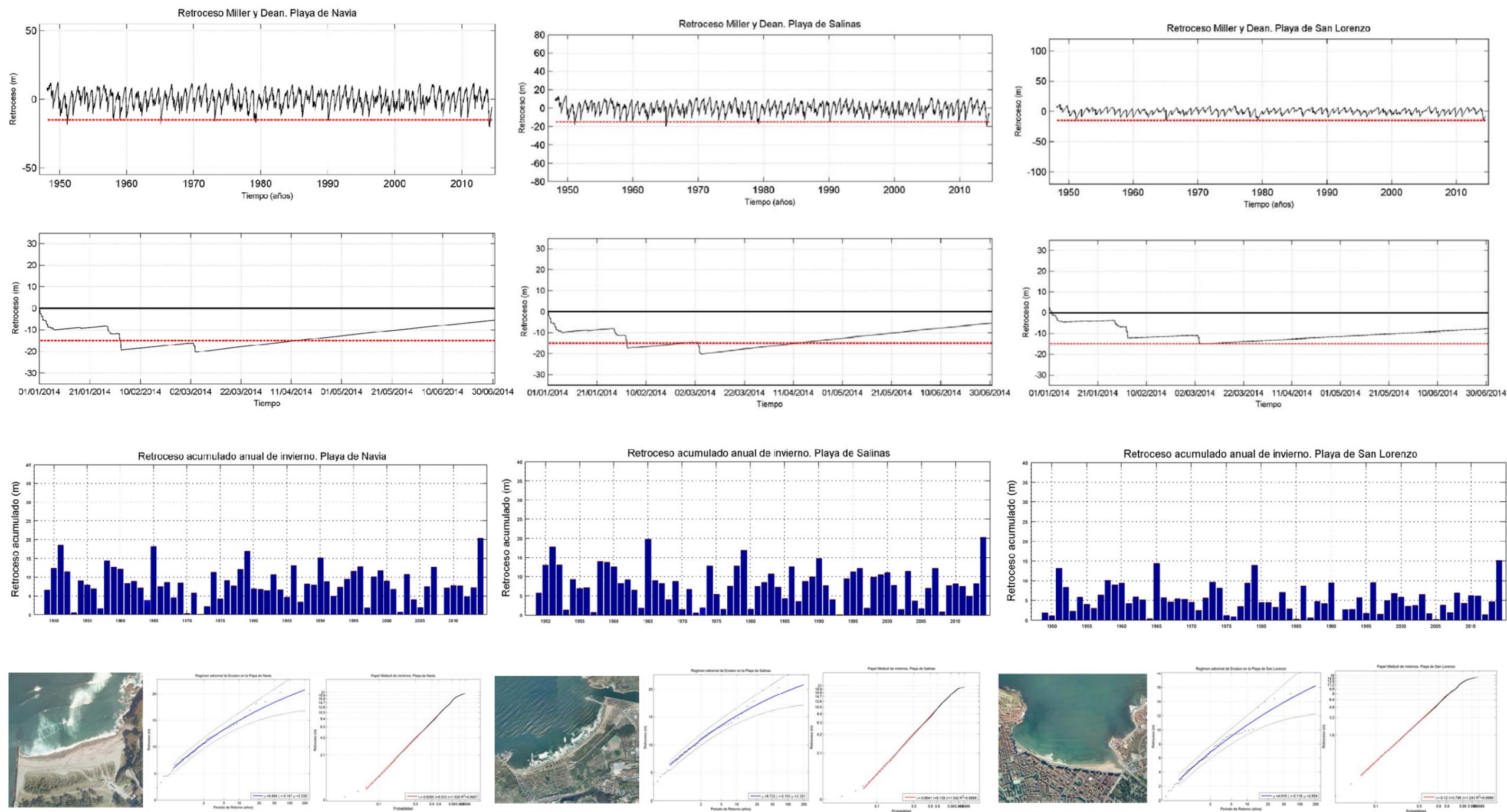


Figura 4.80. Series de erosión-acreción (paneles superiores), retroceso acumulado anual de invierno (paneles intermedios) y regímenes medio y extremal (paneles inferiores) en las playas de Navia, Salinas y San Lorenzo.

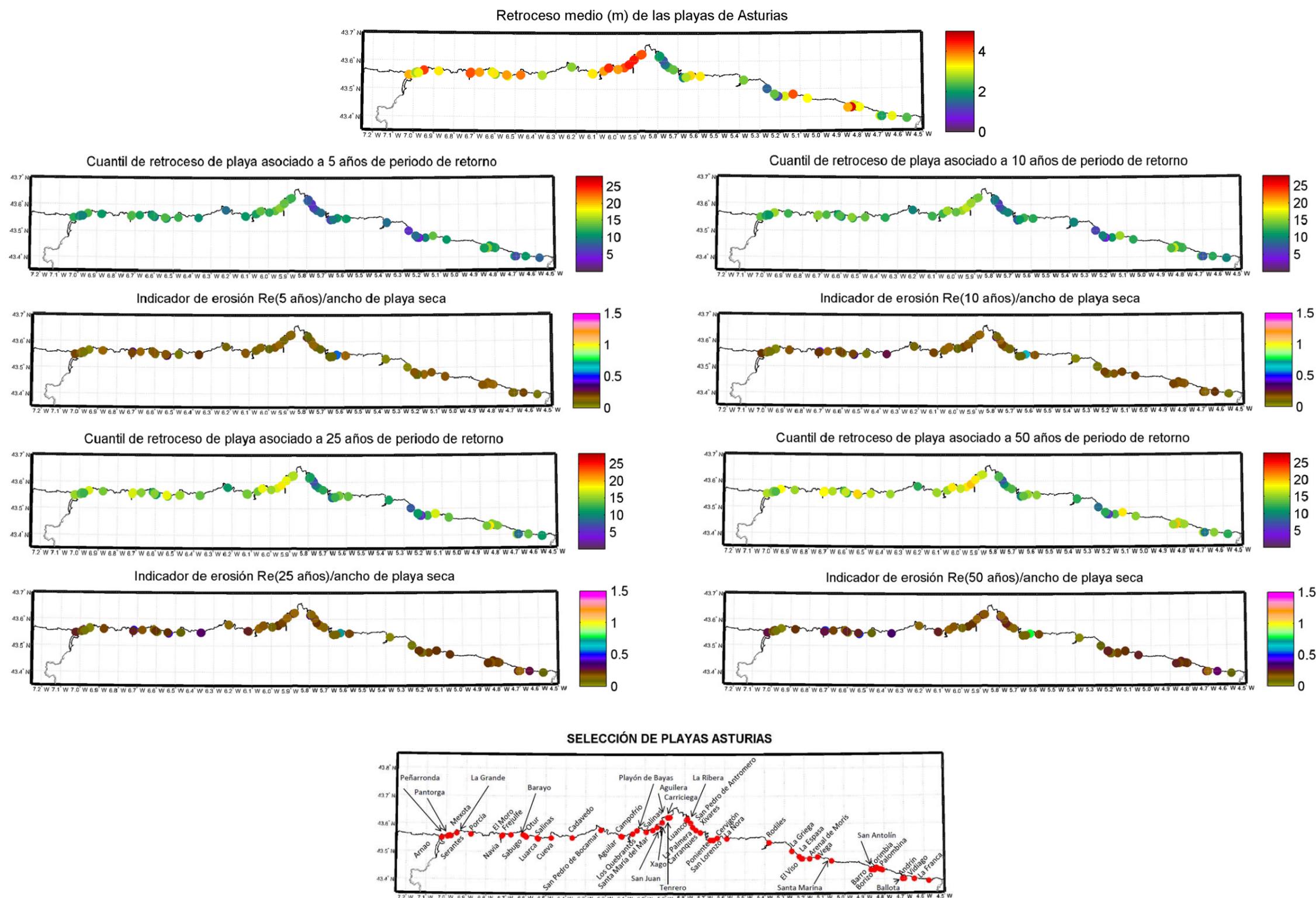
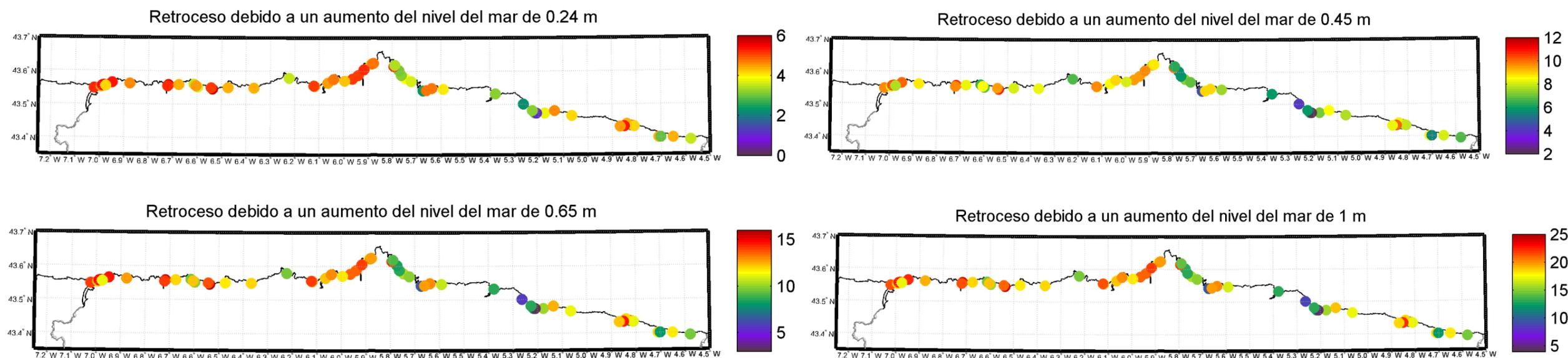


Figura 4.81. Retroceso medio, cuantiles de retroceso de 5, 10, 25 y 50 años de periodo de retorno e indicadores asociados, para el clima actual.



SELECCIÓN DE PLAYAS ASTURIAS



Figura 4.82. Retiro de los perfiles de playa para aumentos del nivel medio del mar de 0.24 m, 0.45 m, 0.65 m y 1 m.

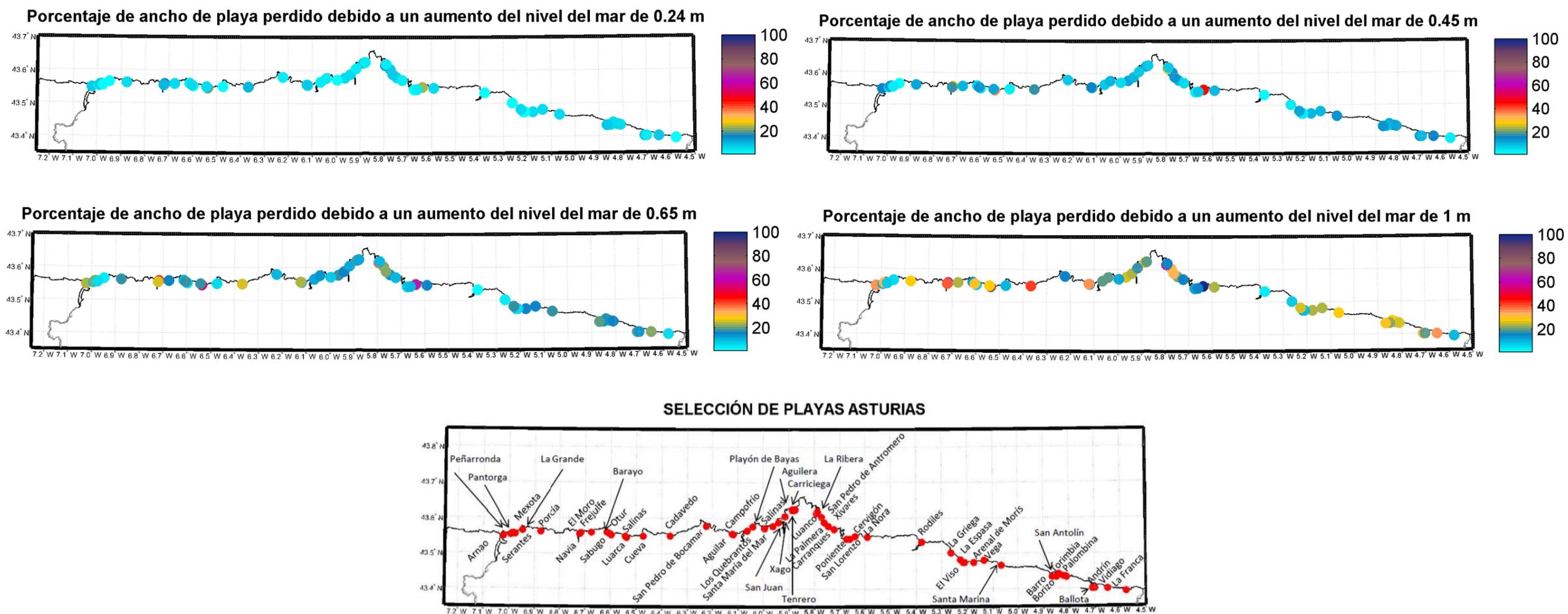


Figura 4.83. Porcentajes de ancho de playa perdido para aumentos del nivel medio del mar de 0.24 m, 0.45 m, 0.65 m y 1 m.

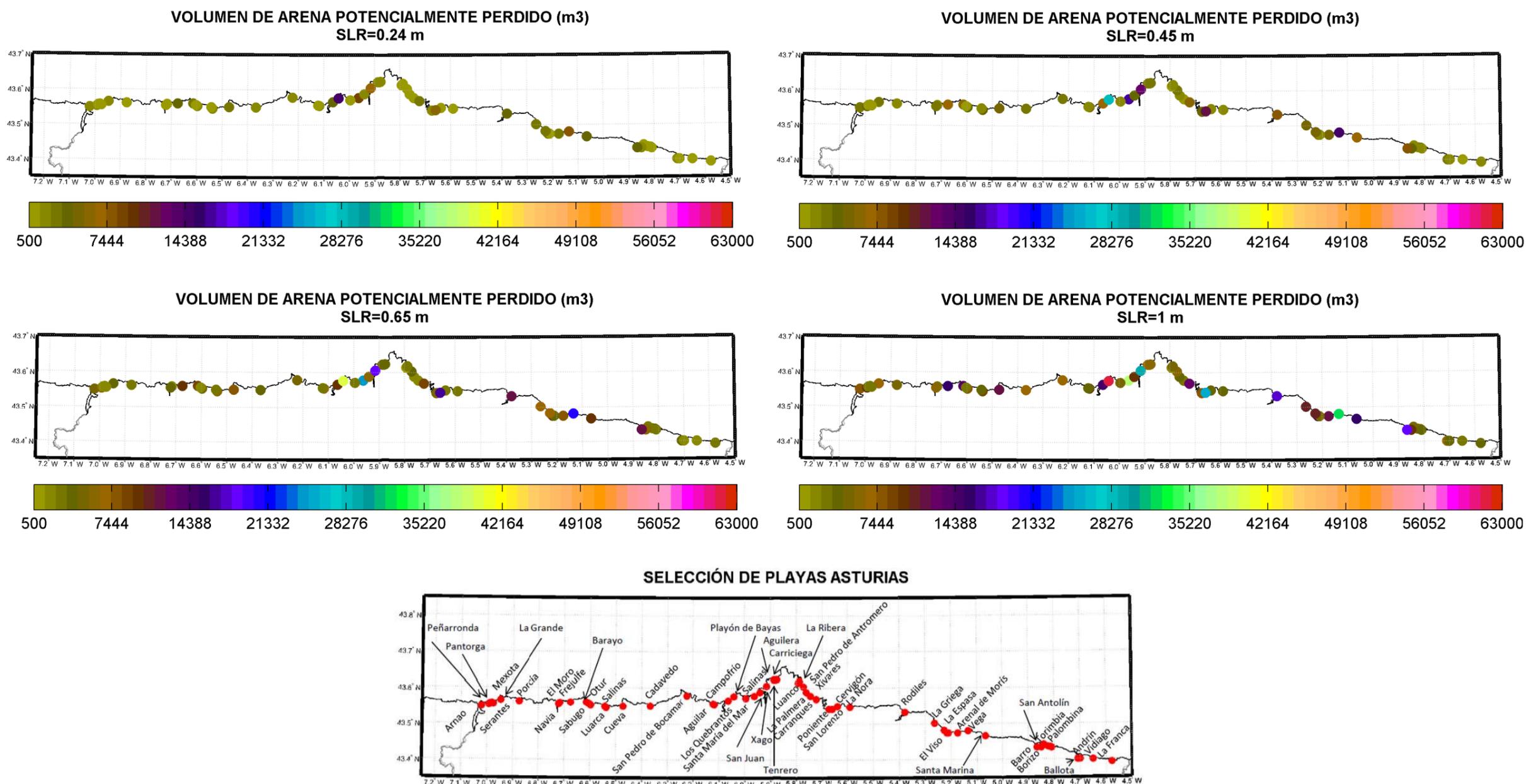


Figura 4.84. Volumen de arena potencialmente perdido para aumentos del nivel medio del mar de 0.24 m, 0.45 m, 0.65 m y 1 m.

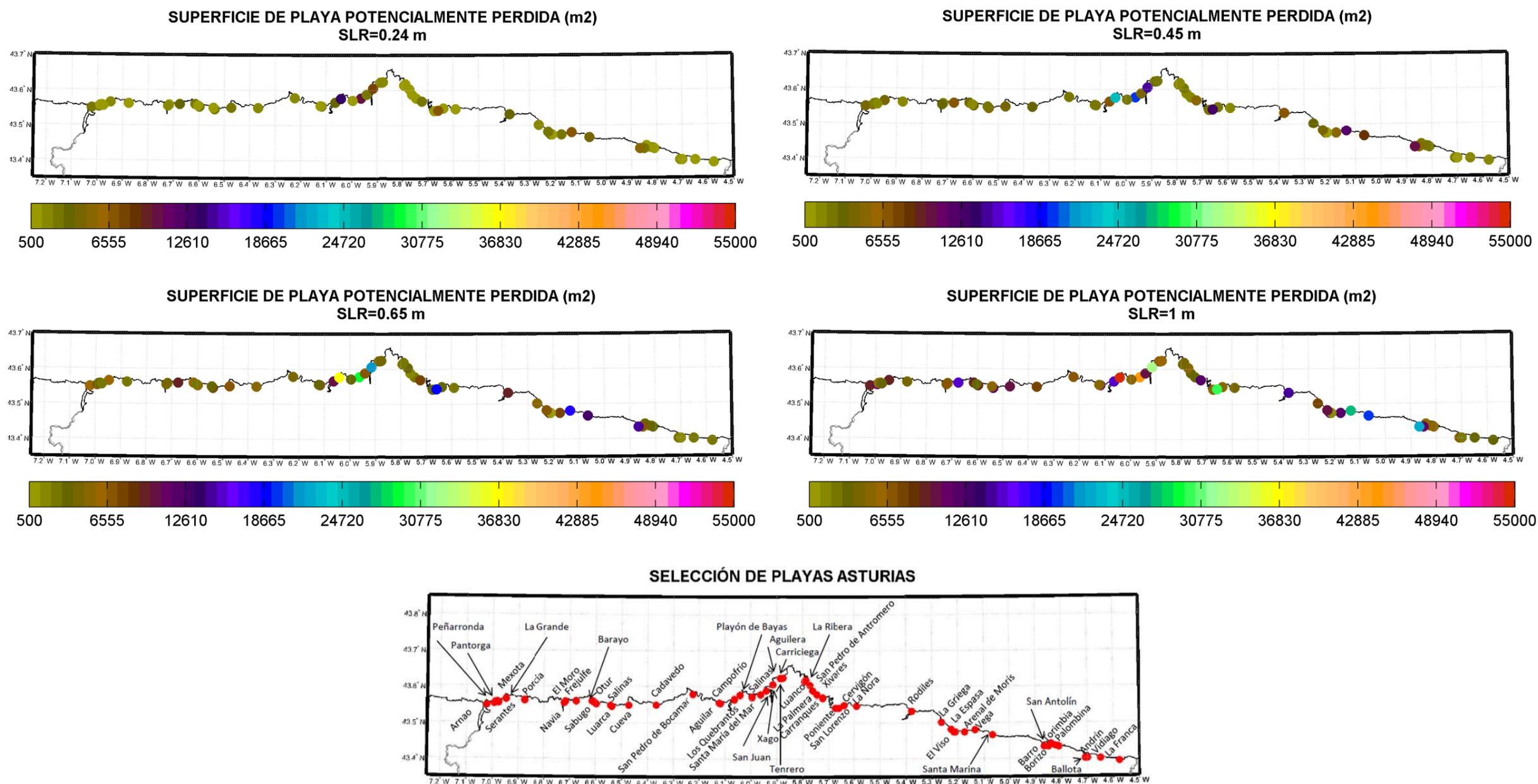


Figura 4.85. Superficie de playa potencialmente perdida para aumentos del nivel medio del mar de 0.24 m, 0.45 m, 0.65 m y 1 m.

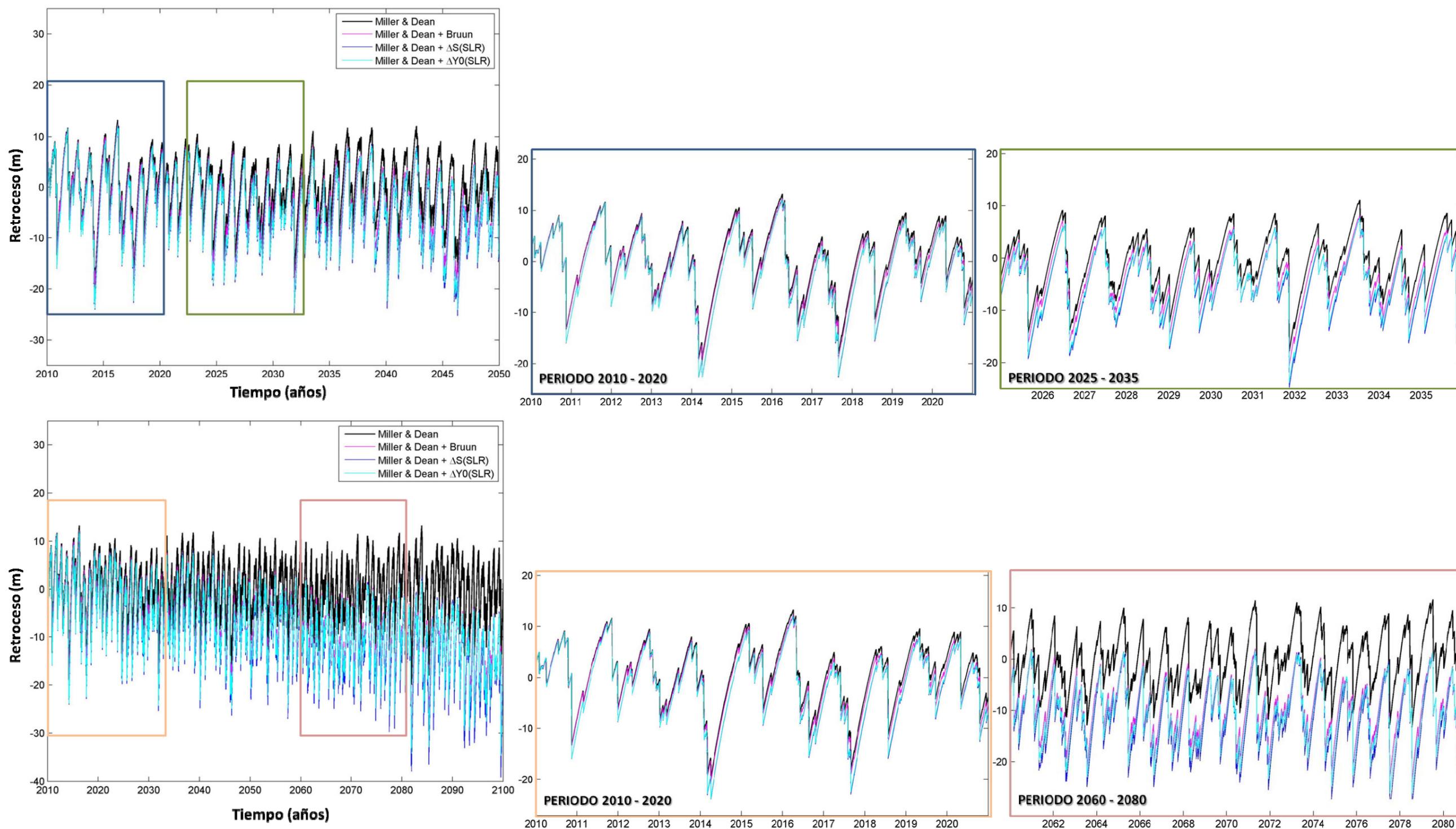


Figura 4.86. Proyección de la serie erosión-acrreción a 2050 (con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m) y a 2100 (con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m) en la playa de Navia.

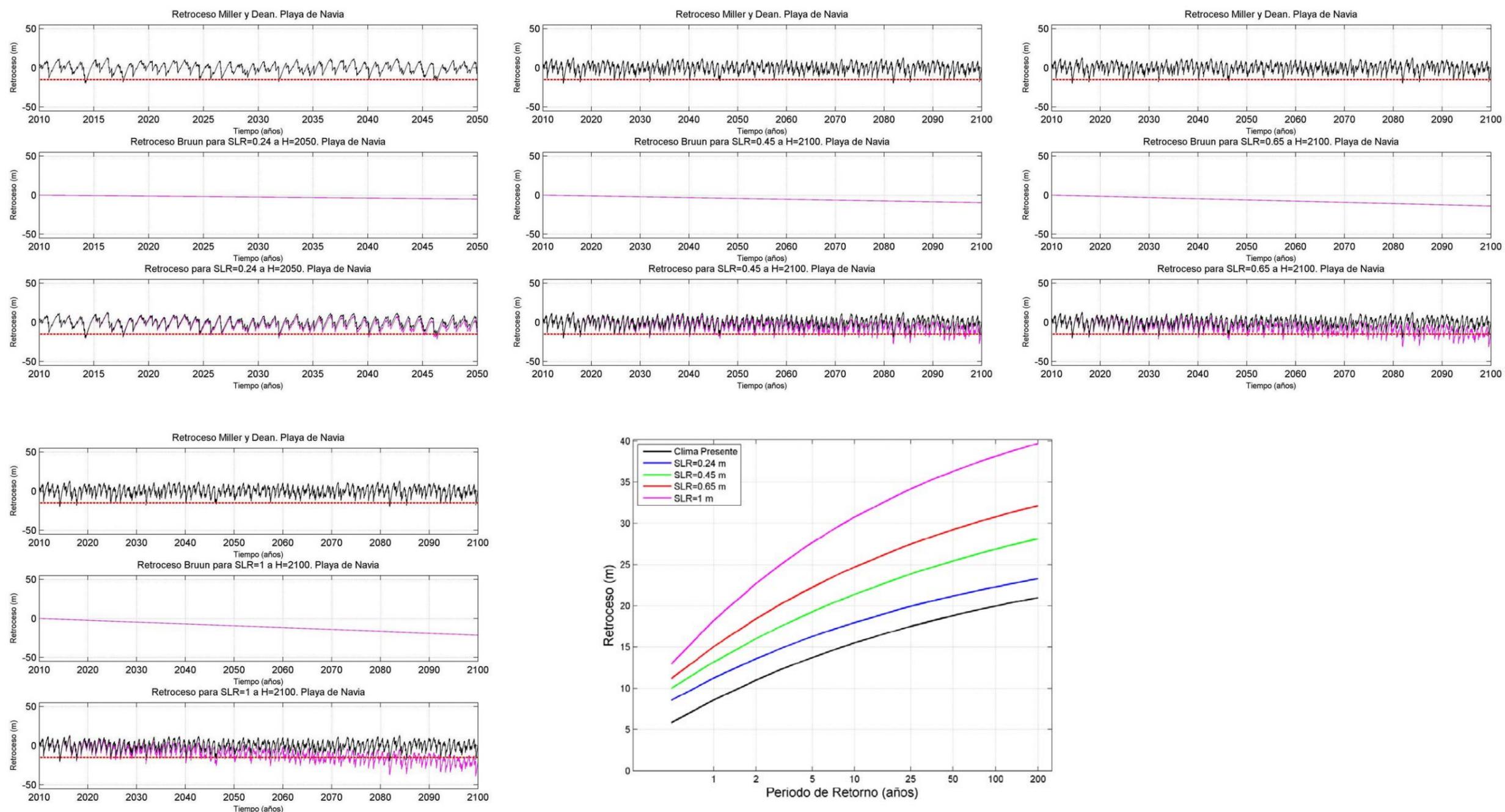


Figura 4.87. Proyección de la serie erosión-acreción a 2050 (con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m) y a 2100 (con aumentos del nivel medio del mar de 0.45 m, 0.65 m y 1 m) en la playa de Navia. Primera aproximación empleada para agregar el aumento del nivel medio del mar a los efectos de corto plazo.

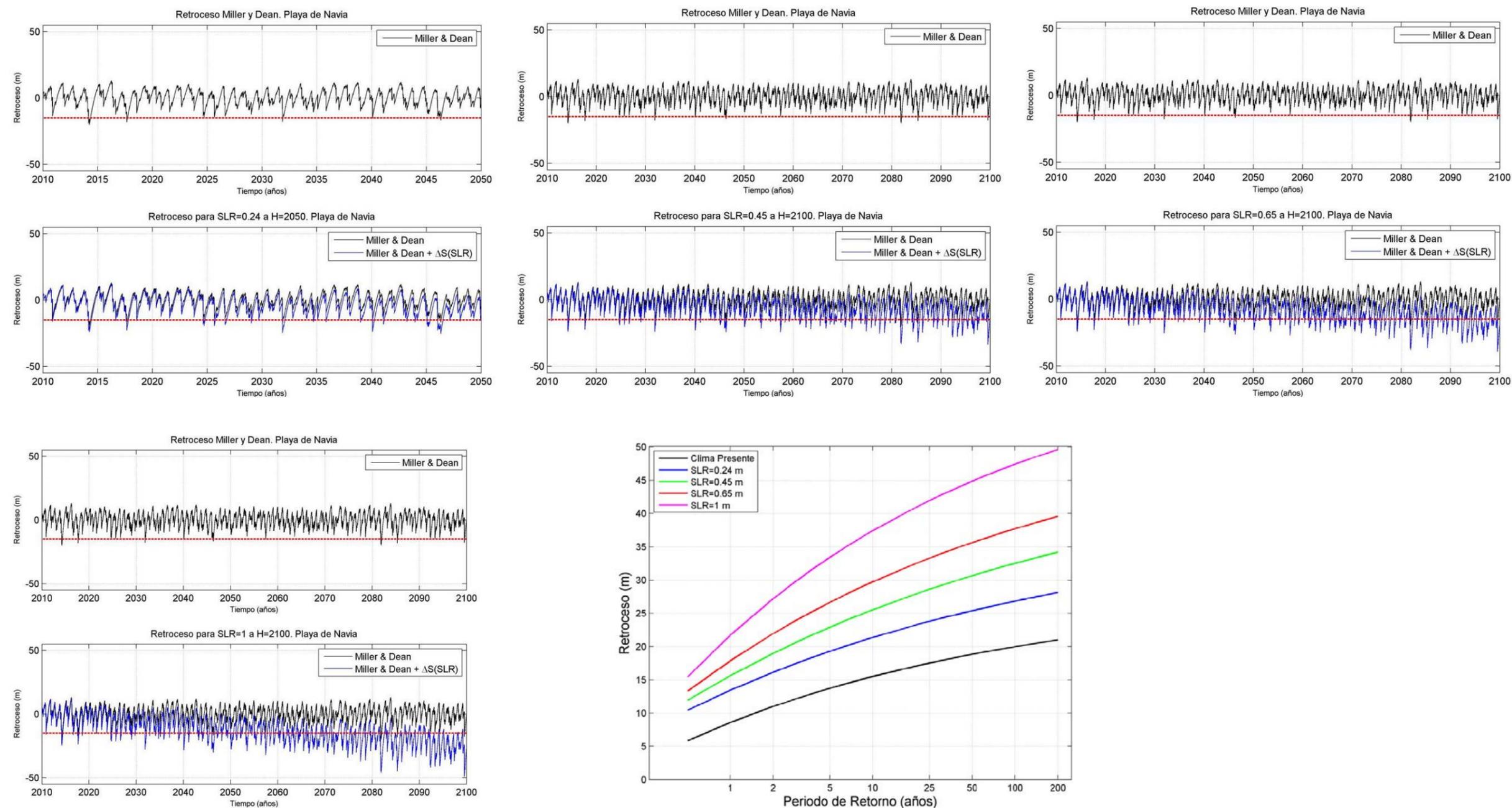


Figura 4.88. Proyección de la serie erosión-acreción a 2050 (con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m) y a 2100 (con aumentos del nivel medio del mar de 0.45 m, 0.65 m y 1 m) en la playa de Navia. Segunda aproximación empleada para agregar el aumento del nivel medio del mar a los efectos de corto plazo.

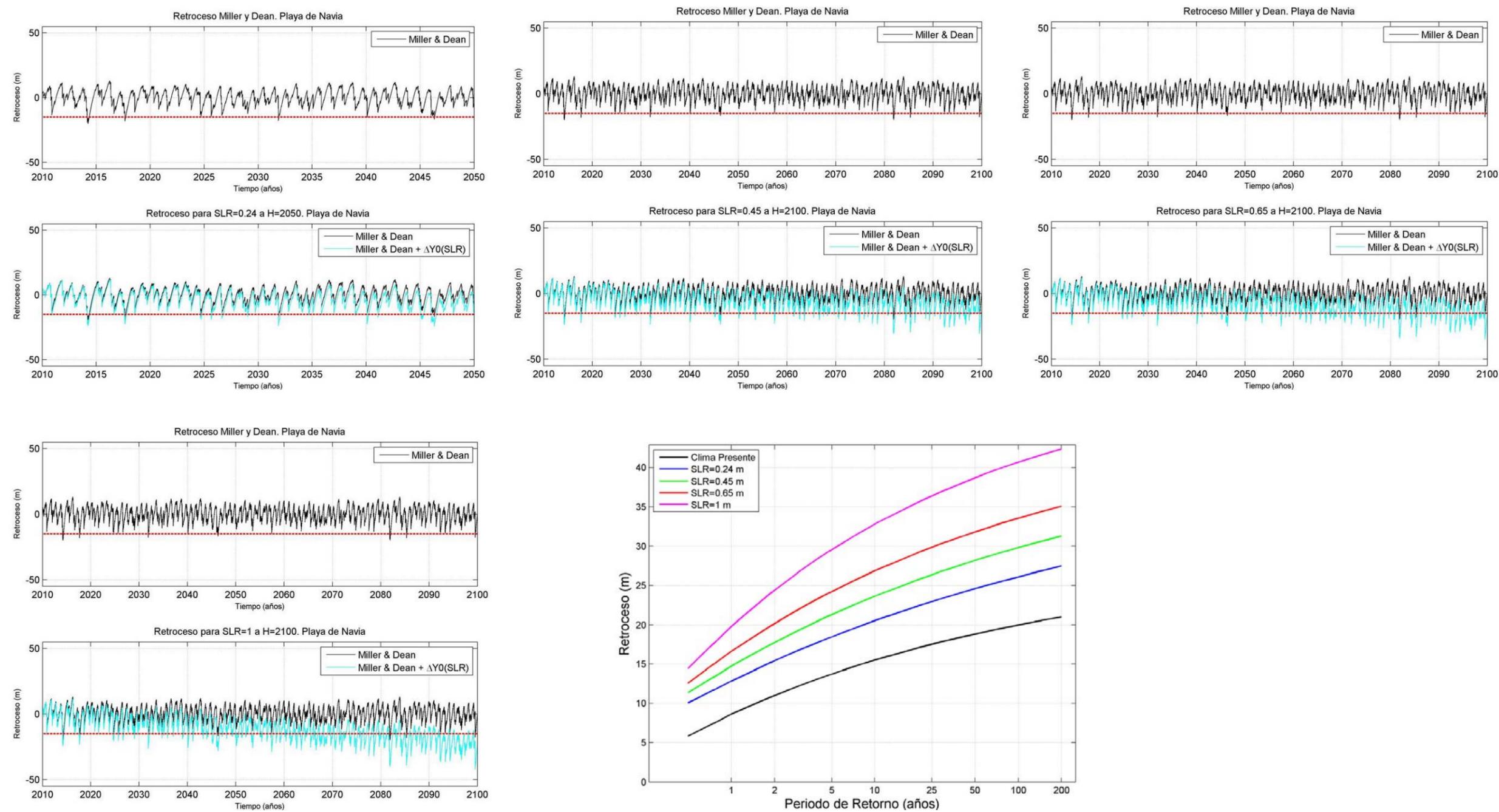


Figura 4.89. Proyección de la serie erosión-acreción a 2050 (con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m) y a 2100 (con aumentos del nivel medio del mar de 0.45 m, 0.65 m y 1 m) en la playa de Navia. Tercera aproximación empleada para agregar el aumento del nivel medio del mar a los efectos de corto plazo.

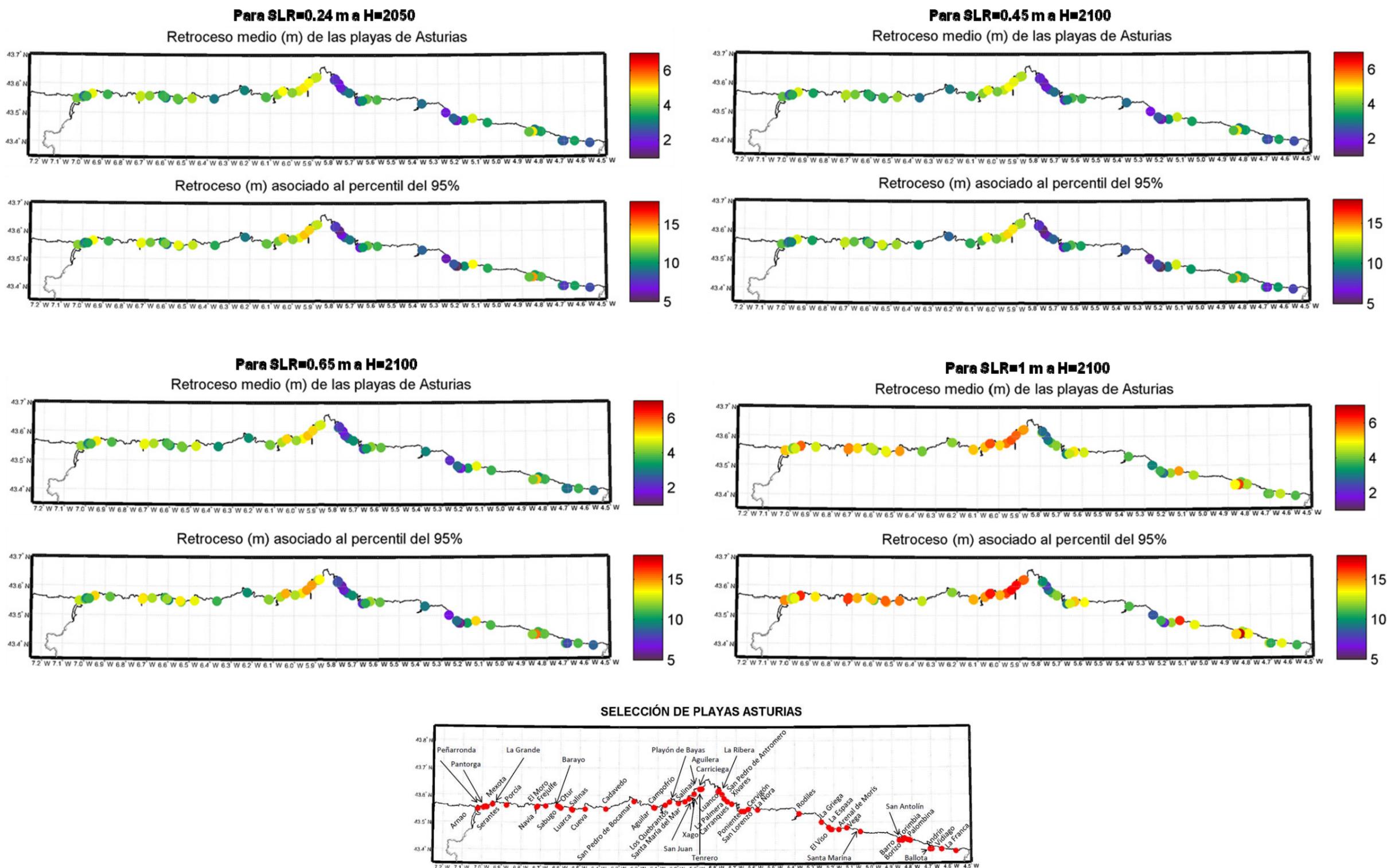


Figura 4.90. Retroceso medio y percentil del 95% para aumentos del nivel medio del mar de 0.24 m, 0.45 m, 0.65 m y 1 m.

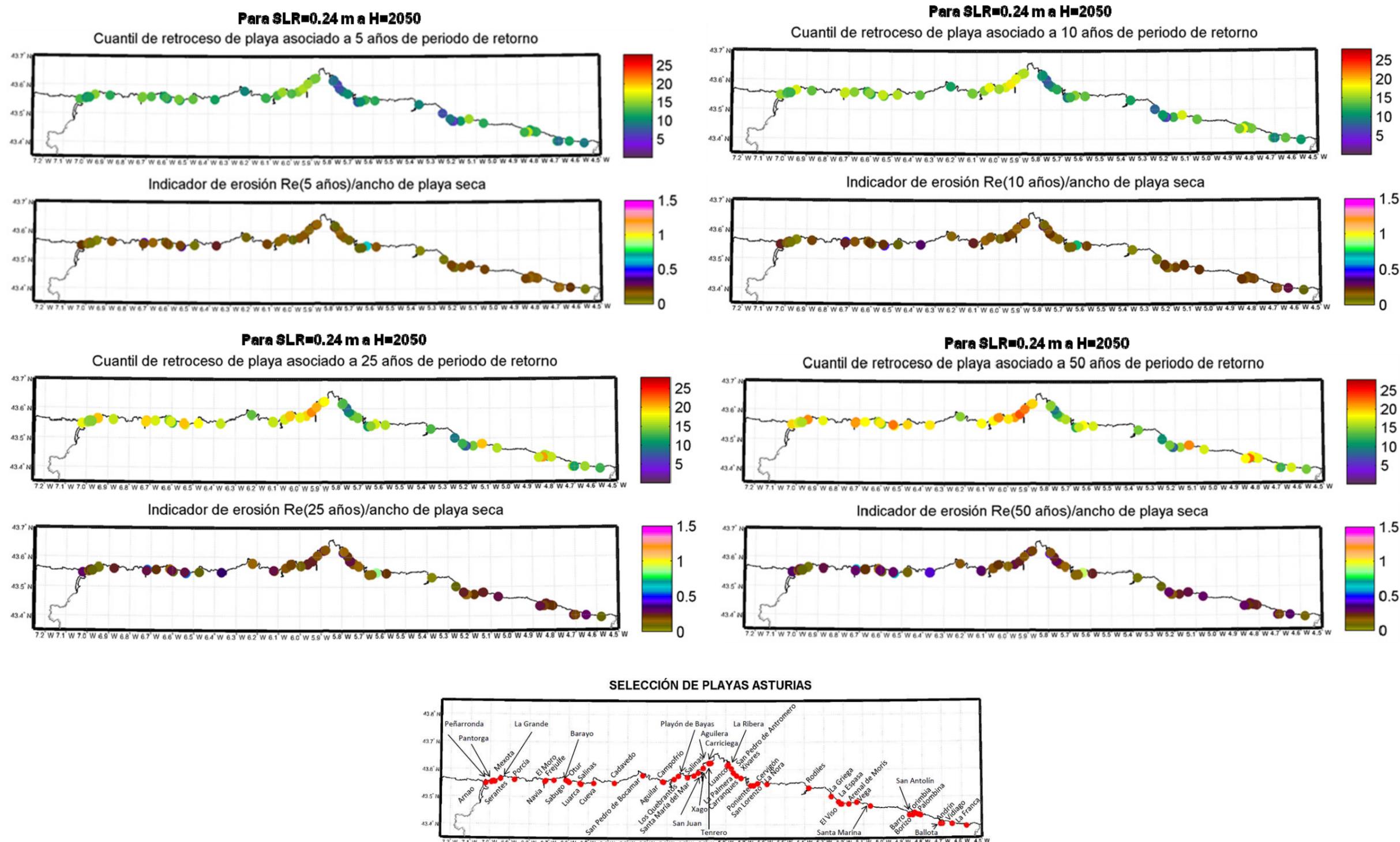


Figura 4.91. Cuantiles de retroceso de 5, 10, 25 y 50 años de periodo de retorno e indicadores asociados para un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m.

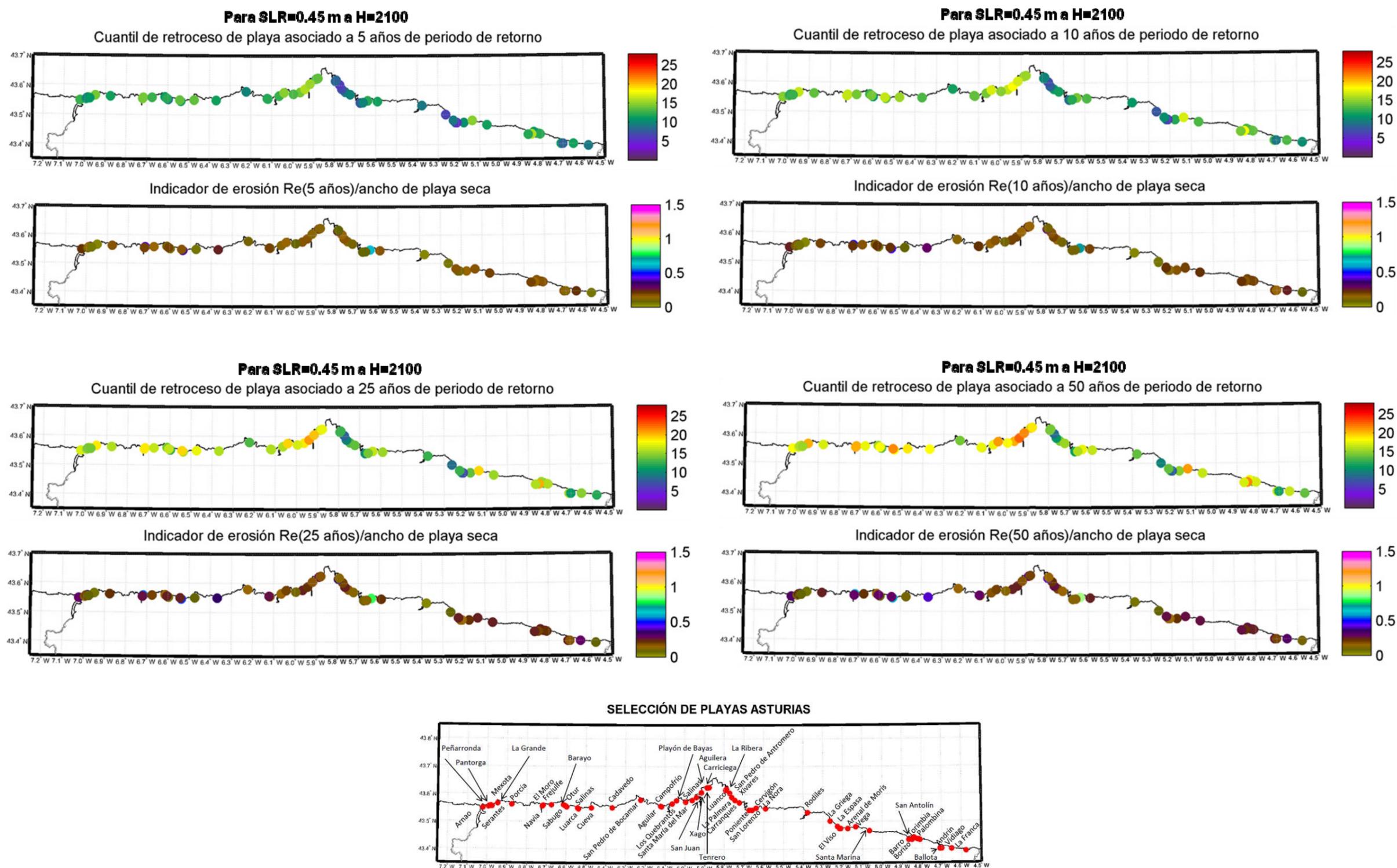


Figura 4.92. Cuantiles de retroceso de 5, 10, 25 y 50 años de periodo de retorno e indicadores asociados para un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m.

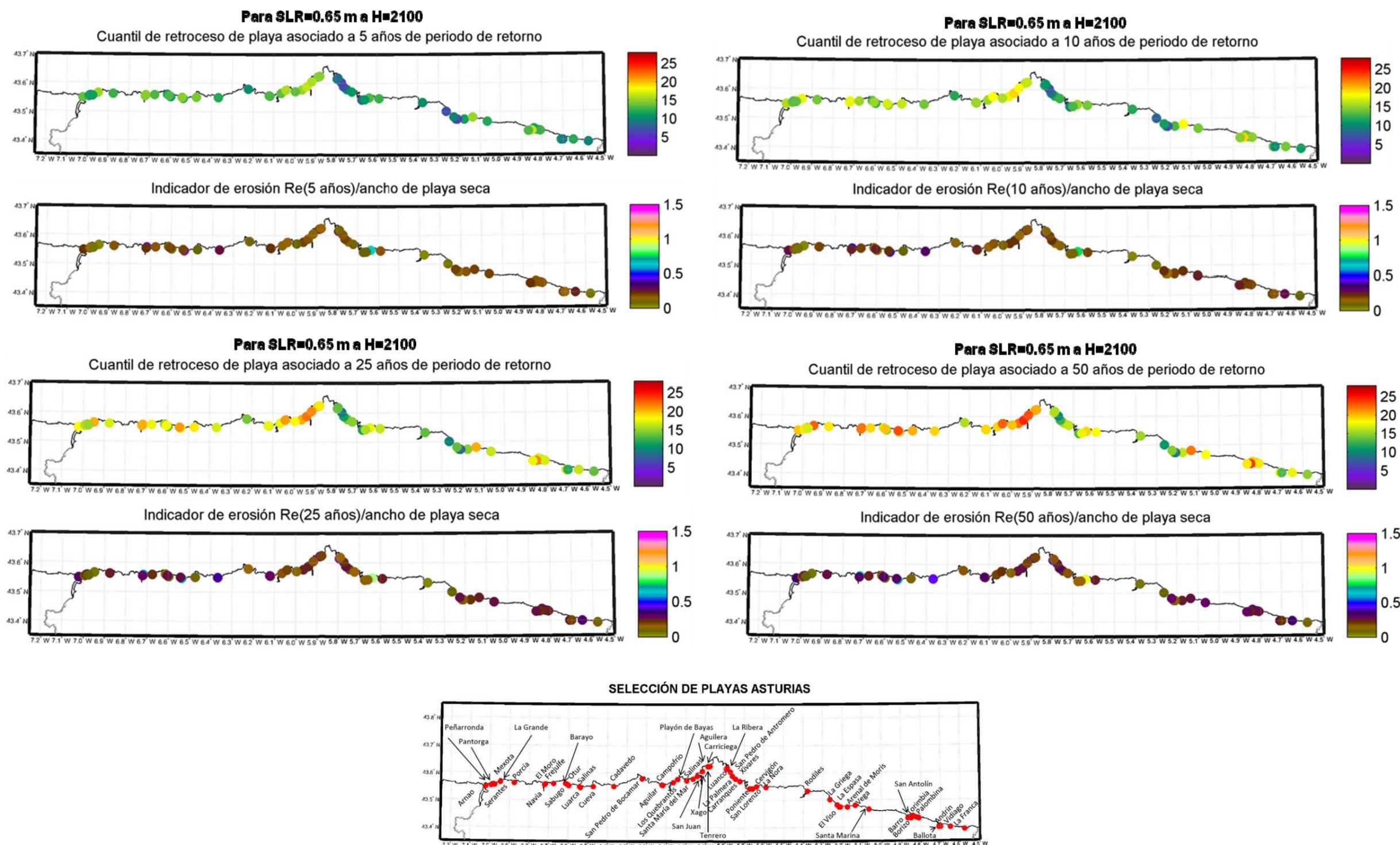


Figura 4.93. Cuantiles de retroceso de 5, 10, 25 y 50 años de periodo de retorno e indicadores asociados para un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m.

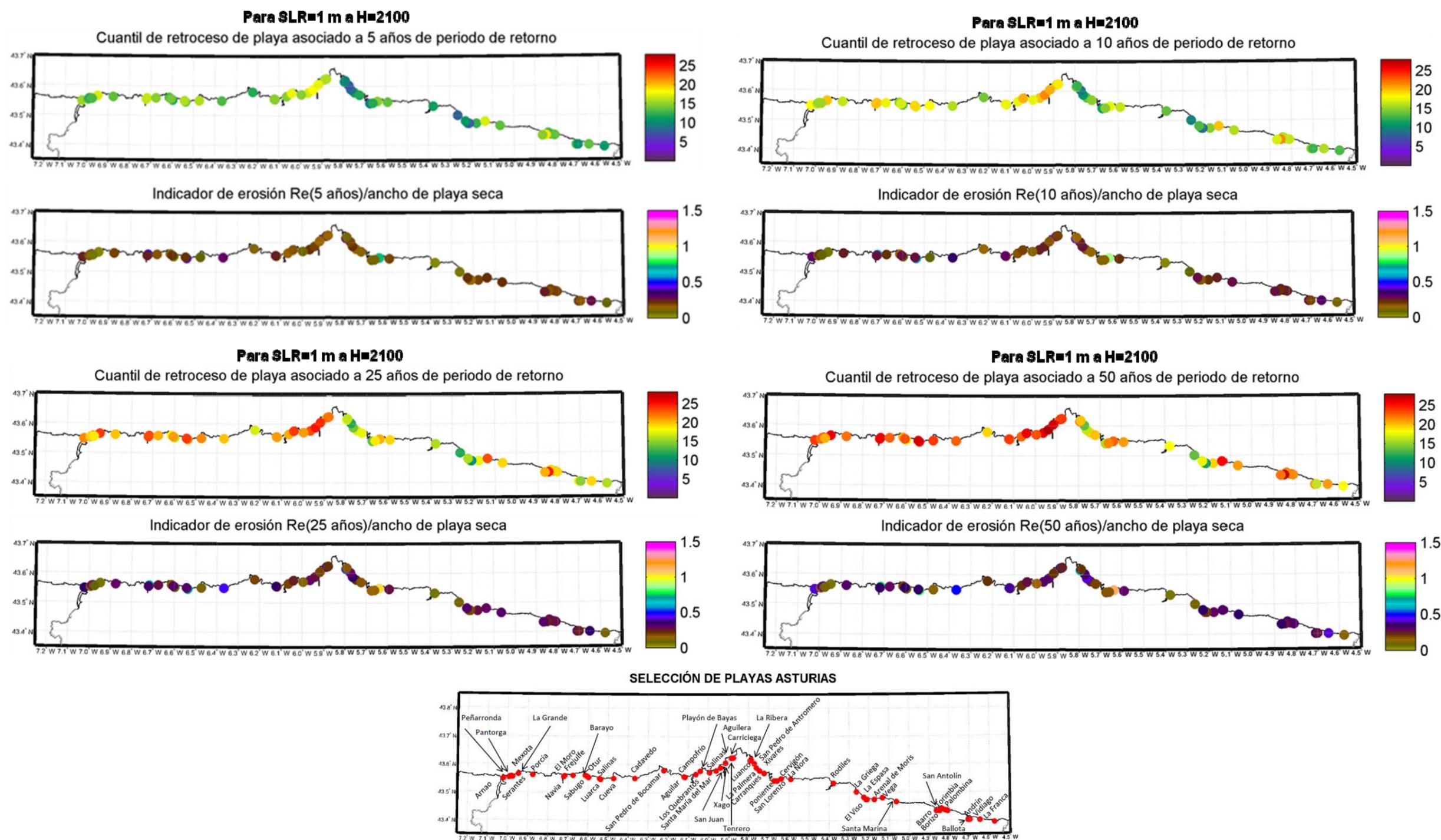


Figura 4.94. Cuantiles de retroceso de 5, 10, 25 y 50 años de periodo de retorno e indicadores asociados para un aumento del nivel medio del mar de 1 m.

5. CAMBIOS MORFODINÁMICOS EN ESTUARIOS

5.1. Introducción

En este capítulo se analizan los efectos del cambio climático asociados al incremento del nivel medio del mar en las características morfológicas de los principales estuarios asturianos: Eo, Navia, Nalón, Avilés, Villaviciosa y Ribadesella.

En primer lugar, se realiza una breve revisión del estado del conocimiento sobre los modelos y técnicas que permiten analizar la evolución morfodinámica a largo plazo de estuarios. A continuación, se describen los estuarios objeto de estudio, se plantea una metodología para evaluar los impactos del cambio climático en los estuarios y se describen las bases de datos utilizadas. Finalmente, se aplica la metodología propuesta a los casos de estudio, presentando como resultado, el balance sedimentario experimentado en cada uno.

5.2. Estado del conocimiento

La morfología de un estuario es el resultado de la interacción no lineal entre el movimiento hidrodinámico del agua, el transporte de sedimentos y la batimetría. En las últimas décadas se ha llevado a cabo una laboriosa investigación científica para predecir la evolución morfológica a largo plazo (escala de decenas de años), tanto de las zonas costeras como de los estuarios. Sin embargo, la dificultad existente para simular los procesos no lineales y la intervención de una amplia variedad de escalas espacio-temporales hace que a día de hoy, esta capacidad predictiva aún se encuentre limitada.

En el modelado de la morfología de zonas costeras, incluyendo los estuarios, hay dos aproximaciones principales descritas por de Vriend et al. (1993): los modelos de equilibrio y los modelos de procesos. A continuación se describe brevemente cada una de ellas.

5.2.1. Modelos de equilibrio

Los modelos de equilibrio se basan en relaciones empíricas entre diferentes elementos morfodinámicos (desembocadura, canales, bajos interiores, bajo exterior...) y el prisma de marea, por lo tanto, dependen en gran medida de la disponibilidad de medidas de campo sobre estos parámetros. De Vriend (1996) establece a su vez diferentes categorías: modelos basados en datos, modelos empíricos y modelos semi-empíricos.

Los *modelos basados en datos*, asumen que los elementos morfodinámicos continúan su evolución con la misma tendencia que en el pasado (Larson et al., 2003 y Southgate et al., 2003).

Los *modelos empíricos* se subdividen a su vez en otras dos categorías: los modelos empíricos de estado de equilibrio y los modelos empíricos de evolución.

- Los *modelos empíricos de estado de equilibrio* establecen relaciones de equilibrio entre los elementos morfológicos mediante el análisis de los datos medidos de sus características morfológicas. Por ejemplo, O'Brien (1931,1969) desarrolló una relación de equilibrio entre la sección transversal de la desembocadura y el prisma de marea (volumen de agua que entra y sale de un estuario durante los ciclos de mareas vivas).

- Los *modelos empíricos de evolución* describen la variación de un parámetro morfológico entre un estado real dado y su estado de equilibrio, como un proceso de decaimiento exponencial definido matemáticamente por de Vriend et al. (1996), asumiendo que cada elemento del sistema se comporta de forma independiente.

Los *modelos semi-empíricos* permiten simular la evolución morfodinámica de los distintos elementos combinando las relaciones empíricas para equilibrios morfológicos con las descripciones agregadas de los procesos físicos. Con este enfoque se han desarrollado numerosos modelos para distintos elementos que componen un estuario, entre otros muchos cabe citar: el modelo de cuenca de Di Silvio (Di Silvio, 1989), el modelo de cuenca de Van Dongeren (Van Dongeren y de Vriend, 1994) y el modelo de delta de de Vriend (de Vriend et al, 1989).

Los modelos semi-empíricos más recientes son ESTMORF (Wang et al., 1998, 1999) y ASMITA (Stive et al., 1998, Stive y Wang, 2003). En este tipo de modelos se supone que las condiciones de equilibrio de las diferentes características de las cuencas de marea son conocidas, y que la cuenca de marea simulada se dirige hacia dicho punto de equilibrio.

El modelo ASMITA supone una agregación y una extensión del modelo ESTMORF ya que, además de tener en cuenta la cuenca interior, se incluye una esquematización del bajo exterior. La agregación se relaciona con el hecho de que cada elemento morfológico es caracterizado por una sola variable, es decir, su volumen de equilibrio (Kragtewijk et al. 2004).

5.2.2. Modelos de procesos

Los modelos de procesos se basan en la descripción de los procesos físicos subyacentes que se derivan de las dinámicas actuantes en los estuarios. Para ello, se componen de un determinado número de módulos que describen el movimiento del agua (olas y corrientes), el transporte de sedimentos y los cambios del fondo por medio de la resolución de las ecuaciones de la hidrodinámica y de transporte de sedimentos. Estos módulos interactúan dinámicamente con la batimetría intercambiando información y dando lugar a la evolución morfológica. Este tipo de modelos han sido empleados en diferentes estudios relativos a la evolución, en diferentes escalas, de morfología de cuencas mareales y estuarios, tales como Wang et al. (1995), Lesser et al. (2004), Marciano et al. (2005), Van der Wegen y Roelvink (2008), Van der Wegen et al. (2008), Dissanayake et al. (2009), Tung et al. (2009, 2011).

Para analizar la evolución morfológica a largo plazo de un estuario utilizando modelos de procesos es necesario realizar simulaciones continuas durante dicho periodo de tiempo (decenas de años). No obstante, el empleo de esta técnica presenta algunos inconvenientes. En primer lugar, estos modelos emplean las ecuaciones de gobierno hidrodinámicas y de transporte de sedimentos cuyos resultados en simulaciones continuas de varios años de duración presentan gran incertidumbre. Lesser (2009) cuantificó los errores cometidos por dichas formulaciones y comprobó que las deficiencias introducidas no eran para nada despreciables. Otra desventaja sería el hecho del elevado coste de tiempo y recursos computacionales que supondría una simulación de este tipo. Para resolver este problema de Vriend et al. (1993) describió dos técnicas distintas.

Por un lado, está la técnica conocida como “model reduction”, la cual se apoya en la idea de que el modelo puede ser reformulado para describir solo aquellos procesos que pertenezcan a la escala de interés. Diversas aproximaciones de este tipo han sido estudiadas por de Vriend et al. (1993), Cayocca (2001), Lesser et al. (2004), y Roelvink (2006). Lesser et al. (2004), basándose en las distintas escalas de tiempo que caracterizan la hidrodinámica y la evolución morfológica, estudió una aproximación a esta técnica que consiste en multiplicar por un factor constante “MorFac” (factor de aceleración morfológica) los flujos de sedimento en cada paso de tiempo hidrodinámico. Esto permite realizar simulaciones morfodinámicas de duración igual al producto de la duración de la simulación hidrodinámica por el factor morfológico. El valor de este factor se establece, dentro de unos límites, en función de las características de la zona de estudio.

Por otro lado, la técnica de simplificación “input reduction” (reducción de inputs), que puede ser complementaria a la anterior, consiste en seleccionar un número limitado de condiciones representativas (forzamientos) que permitan reproducir de forma precisa la evolución morfológica a largo plazo. Actualmente, las ventajas y desventajas de esta técnica están siendo analizadas por distintos autores, como por ejemplo, Lesser (2009) y Walstra et al. (2013). Ambos autores señalan la necesidad de establecer si la evolución morfológica del ambiente estuarino estudiado está dominado por eventos episódicos o si por el contrario, es el resultado de cambios graduales. En el primer caso sería requisito indispensable mantener la cronología de los casos seleccionados para obtener simulaciones morfodinámicas precisas (Brown y Davies, 2009). En el segundo caso, si las modificaciones se producen de forma progresiva, los efectos de los eventos individuales podrían ser promediados y el orden cronológico establecido apenas influiría en los resultados.

5.2.3. Requerimientos de los modelos

La aplicación de ambos tipos de modelos (modelos de equilibrio y modelos de procesos) para analizar la evolución morfodinámica a largo plazo de un estuario requiere disponer de una serie de datos de partida comunes:

- Batimetrías de detalle actuales que permitan la correcta caracterización morfológica del estado actual de los estuarios.
- Batimetrías históricas que permitan calibrar y validar los modelos empleados.
- Registro de las actuaciones antrópicas a las que históricamente han sido sometidos los estuarios (rellenos, dragados, cierres, aberturas, etc.) para calibrar y validar los modelos empleados.
- Series históricas de las dinámicas que juegan un papel importante en el transporte de sedimentos residual a largo plazo (marea astronómica, oleaje y caudal fluvial).
- Aportes de sedimentos al estuario (aportes fluviales, aportes de la playa adyacente y aportes del mar exterior).

Además de los puntos anteriores, cada modelo presenta unos requerimientos específicos:

- Los *modelos empíricos* necesitan conocer la tasa de crecimiento de la cota de los bajos interiores de los estuarios, parámetro muy dependiente de los aportes sedimentarios del río.
- Análogamente, los *modelos semi-empíricos* utilizan unas tasas específicas de transporte de sedimentos entre las distintas unidades morfológicas de los estuarios y una concentración de sedimentos global en el exterior.
- Por su parte, los *modelos de procesos* necesitan conocer la distribución sedimentológica del fondo de los estuarios así como su mapa de isopacas. Otro requisito imprescindible para aplicar dichos modelos sería tener perfectamente acotado el error introducido. Además, es preciso avanzar en la aplicación de dos tipos de técnicas que reduzcan la carga computacional y hagan posible simular décadas y centenas de años: (1) *reducción de inputs* y (2) *aceleración morfológica*, tratándose ambos de temas muy novedosos que están siendo estudiados en la actualidad por diversos autores.

5.2.4. Conclusiones del estado del conocimiento

A partir del análisis realizado del estado actual del conocimiento se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los *modelos empíricos de equilibrio* proporcionan información general de las áreas y volúmenes de equilibrio de los distintos elementos morfológicos de los estuarios. Sin embargo, no son capaces de describir la evolución temporal experimentada por cada elemento ni su distribución espacial. En cualquier caso, la sencillez de aplicación de este tipo de modelos los convierte en la aproximación más extendida.
- Los *modelos semi-empíricos* permiten conocer la evolución temporal experimentada por cada elemento morfológico de forma agregada, sin proporcionar la distribución espacial de cada elemento.
- Los *modelos de procesos* proporcionan la evolución morfodinámica experimentada por cada elemento morfológico, así como la ubicación y la forma adoptada por cada uno en el interior de los estuarios. En cualquier caso, aunque el empleo de modelos de procesos aporta resultados de gran detalle, se trata de una técnica que a día de hoy presenta muchas limitaciones y es preciso avanzar en su estudio.

En definitiva, en función del objetivo perseguido y de los datos disponibles resultará adecuado el empleo de un tipo de modelo u otro.

En el caso de estudio que nos ocupa, debido a los datos de partida con los que se cuenta y a las limitaciones que presentan los modelos de procesos, se opta por el empleo de una metodología basada en modelos de equilibrio. No obstante, en el informe relativo a la tarea 1.3, se ha desarrollado una metodología basada en modelado de procesos y se ha aplicado en un estuario piloto, Villaviciosa.

5.3. Objetivos

El objetivo general de este capítulo es analizar los principales impactos del cambio climático en las características morfológicas de los estuarios aplicando modelos de equilibrio. En concreto se analiza la evolución de la desembocadura, el bajo exterior, los canales y los bajos interiores. Como objetivos particulares se plantean los siguientes:

- Adaptar las formulaciones empíricas del estado del conocimiento a la zona de estudio utilizando los datos disponibles.
- Aplicar dicha metodología en los siguientes estuarios: Eo, Navia, Nalón, Avilés, Villaviciosa y Ribadesella.
- Obtener los cambios estimados en los principales elementos morfológicos de estos estuarios debido a la subida del nivel del mar.

5.4. Descripción de los estuarios de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada en la costa cantábrica. Se trata de los estuarios de mayor entidad del Principado de Asturias. De oeste a este se encuentran: Eo, Navia, Nalón, Avilés, Villaviciosa y Ribadesella (véase la figura 5.1), donde se va a analizar el efecto del cambio climático en la configuración morfológica de los mismos. El rango de marea astronómica para todo el mar Cantábrico toma valores entre 1 y 5 metros, lo que indica que se trata de estuarios con una clara influencia mesomareal.

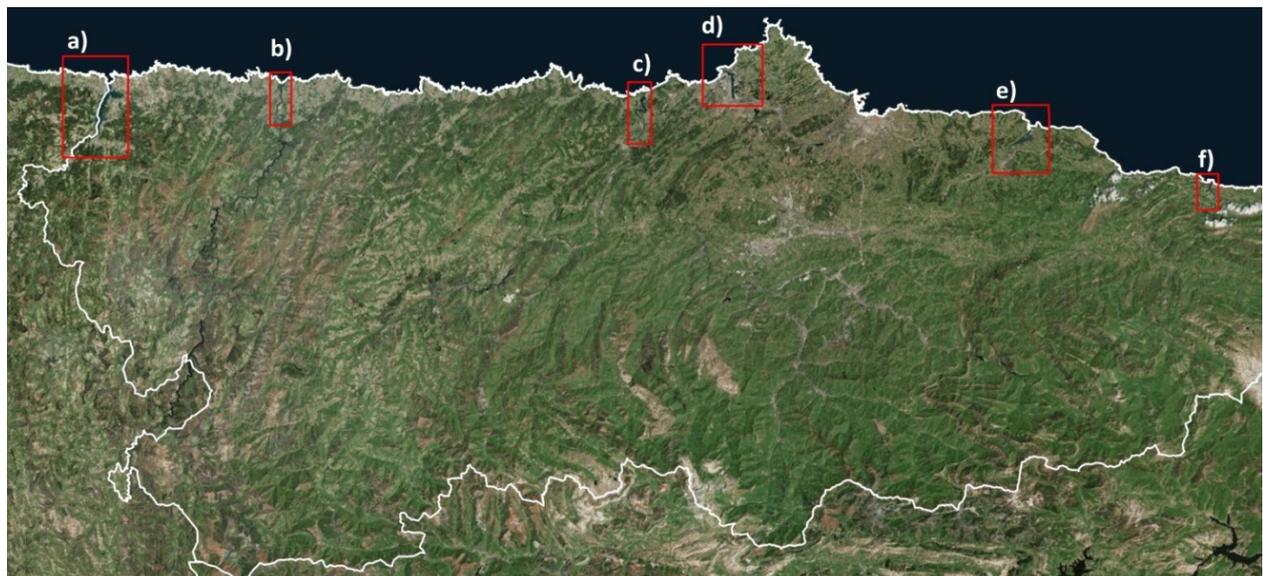


Figura 5.1. Localización de los estuarios objeto de estudio: a) Eo, b) Navia, c) Nalón, d) Avilés, e) Villaviciosa y f) Ribadesella.

A continuación, se describen brevemente las principales características de los estuarios objeto de estudio. Los valores de los aportes fluviales medios han sido extraídos a partir de los registros de aforos contenidos en la página <http://hercules.cedex.es>. Para una descripción más detallada de los distintos estuarios se remite al lector a la página www.asturias.es.

5.4.1. Estuario del Eo

El estuario del Eo está situado en el extremo occidental de la costa de Asturias compartida con Galicia, en la desembocadura de los ríos Eo, Suarón, el río Grande y el arroyo del Esquilo. Se alinea principalmente en la dirección S-N con una longitud de unos 10 km y una anchura prácticamente constante en torno a los 800 metros desde Vegadeo hasta su desembocadura. Aguas arriba de Vegadeo, la orientación del canal es SO-NE con una longitud en torno a los 6 km (véase la figura 5.2).



Uno de los parámetros que caracterizan la hidrodinámica de los estuarios es el prisma de marea (volumen de agua que entra y sale de un estuario durante los ciclos de mareas vivas). En el caso del estuario del Eo el prisma es de unos $32,6 \times 10^6 \text{ m}^3$ que se traduce en un caudal máximo de marea astronómica de $1500 \text{ m}^3/\text{s}$. Por su parte, el aporte fluvial medio es de $19,3 \text{ m}^3/\text{s}$. En relación al oleaje, se considera como moderadamente expuesto al contar con una de las bocanas más amplias, no sólo de la región asturiana, sino del conjunto de los estuarios cantábricos.

Figura 5.2. Estuario del Eo.

La importancia ecológica de este estuario ha motivado su catalogación como Zona Ramsar y su inclusión en la Red Natura 2000 bajo las figuras de protección ZEPA (Zona de Especial Protección para las Aves) y LIC (Lugar de Interés Comunitario). La parte gallega ha sido declarada Humedal Protegido mientras que la parte asturiana ha sido propuesta como Reserva Natural Parcial. Todo su conjunto se ha incluido en la propuesta para su declaración como Reserva de la Biosfera.

5.4.2. Estuario del Navia

El estuario del Navia está situado en el sector occidental asturiano, en la desembocadura de los ríos Navia y Meiro. La alineación de su canal principal es en dirección S-N con una longitud de unos 10 km aguas arriba de la desembocadura (véase la figura 5.3).

El prisma de marea que presenta este estuario es de unos $4 \times 10^6 \text{ m}^3$, o lo que es lo mismo, un caudal máximo de marea astronómica de $185 \text{ m}^3/\text{s}$. El aporte fluvial medio es de unos $67,4 \text{ m}^3/\text{s}$ y se considera abrigado respecto al oleaje al encontrarse confinado por un sistema duna-playa.

En torno al 21% del área original del estuario ha sido destinada a fines urbanos e industriales, alterando su régimen hidrológico natural. A pesar de ello, este espacio ha sido considerado como LIC y ZEPA dentro del programa Red Natura 2000 por conservar marismas de gran valor, destacando las desarrolladas a lo largo del río Meiro.



Figura 5.3. Estuario del Navia.

5.4.3. Estuario del Nalón



El estuario del Nalón está situado en el sector centro-occidental asturiano, en la desembocadura del río que lleva el mismo nombre. Se alinea en la dirección S-N con una longitud de unos 11 km (véase la figura 5.4).

El prisma de marea de este estuario es de unos $8 \times 10^6 \text{ m}^3$, lo que supone un caudal máximo de marea astronómica de $374 \text{ m}^3/\text{s}$. El aporte fluvial medio es de unos $72,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Además, como consecuencia de la confinación a la que se encuentra sometido por el sistema duna-playa, se considera abrigado respecto al oleaje.

En torno al 7% de la superficie original del estuario se ha visto sometida a presiones antrópicas produciendo cambios importantes en la dinámica y estructura morfológica del estuario. Sin embargo, en la zona intermedia del estuario aún se conservan amplias superficies de marismas activas, lo que ha motivado su inclusión en la Red Natura 2000 bajo las figuras de protección ZEPA y LIC.

Figura 5.4. Estuario del Nalón.

5.4.4. Estuario de Avilés

El estuario de Avilés está situado en el sector central de la costa asturiana, en la desembocadura de pequeños cauces como el río Raíces, el río de la Magdalena o el río de Vioño. Se alinea en la dirección SE-NW hasta la curva de Pachico y a partir de ahí, toma la dirección S-N hasta la desembocadura contando con una longitud total de unos 7 km (véase la figura 5.5).

Presenta un prisma de marea de en torno a los $7,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ y una bocana orientada al NO por lo que, en relación al oleaje, se trata de un estuario moderadamente expuesto.

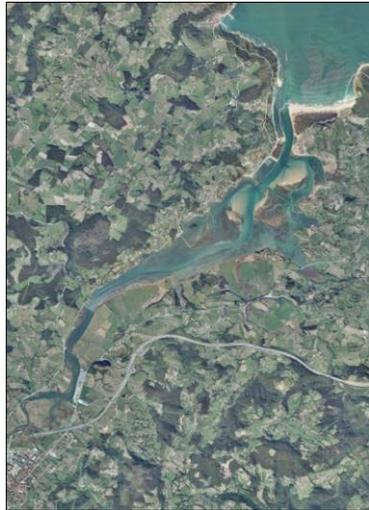
En la actualidad sólo se conserva un 10% de la superficie original estuarina existente antes de la transformación urbana y portuaria, destacando el entorno de la charca de Zeluán y la ensenada de Lloredo, ocupada por llanuras intermareales de tipo fangoso. A pesar de la reducida superficie conservada, estas áreas naturales concentran una importantísima diversidad de especies tanto animales como vegetales que le han valido su declaración como ZEPA y LIC. La charca de Zeluán y Ensenada de Lloredo han sido declarados Monumento Natural.



Figura 5.5. Estuario de Avilés.

5.4.5. Estuario de Villaviciosa

El estuario de Villaviciosa está situado en el sector centro-oriental asturiano, en la desembocadura de los ríos Valdediós, Valdebárcena y el río de la Ría. Se alinea en la dirección SO-NE con una longitud de unos 9 km (véase la figura 5.6).



Se trata de uno de los estuarios mejor conservados de la costa asturiana. No obstante, presenta el 40% de su superficie original modificada por la presencia de rellenos o diques y, por lo tanto, con condiciones de inundabilidad diferentes a las naturales.

El prisma de marea toma un valor en este estuario en torno a $8,25 \times 10^6 \text{ m}^3$, lo que se traduce en un caudal máximo de marea astronómica de $382 \text{ m}^3/\text{s}$. Por otro lado, el aporte fluvial medio es de unos $9 \text{ m}^3/\text{s}$. Todo esto condiciona las principales características del estuario: elevada salinidad del agua, inundaciones periódicas debidas a la marea e intensa sedimentación, lo que origina un gran número de unidades morfosedimentarias.

Figura 5.6. Estuario de Villaviciosa

Como consecuencia de la canalización artificial de la bocana se considera de tipo abrigado respecto al oleaje. Esto ha favorecido la generación de un nuevo sistema dunar en la playa de Rodiles.

Como resultado de estas características tan especiales, este espacio presenta un elevado valor ecológico. En 1995, fue declarada Reserva Natural Parcial. A nivel europeo ha sido declarado como LIC y ZEPA, pasando a formar parte de la Red Natura 2000. Del mismo modo, en enero de 2011, se aprobó su inclusión en la Lista de Humedales de Importancia Internacional (RAMSAR).

5.4.6. Estuario de Ribadesella

El estuario de Ribadesella está situado en el sector oriental de la costa de Asturias, en la desembocadura del río Sella y de otros arroyos de menor importancia. Se alinea en la dirección la dirección S-N con una longitud de unos 7 km desde Omedina hasta la bocana (véase la figura 5.7).

Presenta un prisma de marea de en torno a los $3 \times 10^6 \text{ m}^3$, lo que supone un caudal máximo de marea astronómica de $139 \text{ m}^3/\text{s}$. El aporte fluvial medio es de unos $35 \text{ m}^3/\text{s}$. Respecto al oleaje, se considera de tipo abrigado como consecuencia del semiconfinamiento al que se ve sometido por el sistema duna-playa que estrecha la bocana.

Sobre este sistema se encuentra el núcleo urbano moderno de Ribadesella. Por detrás del cordón dunar aparece un canal secundario formado por el río San Pedro, represado por un dique que impide el desagüe en las bajamares generando una charca permanente (Marquinez et al., 2003). En la margen derecha, asentados sobre antiguos depósitos del estuario, se encuentran el puerto y el casco antiguo de la villa. Valle arriba, se halla la ensenada del Ramu, una de las pocas llanuras fangosas que aún se conservan en el estuario. En los sectores más internos y a ambos lados del cauce se desarrollan marismas que han sido parcialmente desecadas mediante drenajes y diques para su aprovechamiento agropecuario.

A pesar de la presión urbanística a la que se ve sometido el estuario, la presencia de zonas bien conservadas, localizadas fundamentalmente en la margen izquierda, le ha valido su inclusión en la Red Natura 2000 bajo las figuras de protección LIC y ZEPA.



Figura 5.7. Estuario de Ribadesella.

5.5. Metodología

En este apartado se describe la metodología planteada, con base en modelos de equilibrio, para analizar los principales impactos del cambio climático en las características morfológicas de los estuarios.

La morfodinámica sedimentaria en un estuario consiste en un equilibrio dinámico, observándose una morfología media y una cierta variabilidad entorno a ella. Los elementos que definen la morfología media son comunes para todos los estuarios. De este modo, puede observarse la presencia de una zona angosta y profunda que constituye la desembocadura, uno o varios bajos exteriores, una canal principal, canales secundarias y las denominadas llanuras o bajos interiores.

Diversos autores han estudiado la morfología media de los estuarios proponiendo relaciones empíricas en función de los parámetros del estuario, dentro de los cuales el más relevante el prisma de marea. Algunas de estas relaciones tomadas de Van Dongeren (1992), son las que se presentan a continuación.

El área de la sección transversal de la desembocadura es directamente proporcional al prisma de marea del estuario (O'Brien, 1969):

$$A_c = A \cdot \Omega \quad (5.1)$$

Donde A_c es el área de la sección transversal de la desembocadura en media marea (m^2), Ω es el prisma de marea correspondiente a una marea viva (m^3) y A es el coeficiente de ajuste.

La sección transversal A_c representa el área crítica. La sección no podrá ser menor que A_c , ya que la velocidad de la corriente se incrementaría erosionando el sedimento y recuperando la sección de equilibrio. Tampoco podrá ser mayor que A_c , puesto que la velocidad de la corriente mareal disminuiría depositándose sedimento y nuevamente recuperando el área de equilibrio. Por lo tanto, puede decirse que a largo plazo la desembocadura tiende a presentar una sección crítica en equilibrio dinámico.

También relacionado con este parámetro (Ω), Walton y Adams (1976) plantearon una relación del volumen de sedimento de los bajos exteriores en función de Ω con la siguiente estructura:

$$V = B \cdot \Omega^C \quad (5.2)$$

Donde V es el volumen de sedimento de los bajos exteriores (m^3) y B y C son las constantes de proporcionalidad.

En cuanto al interior del estuario, Renger y Eysink desarrollaron formulaciones que relacionan el volumen de los canales mareales con el prisma de marea. Renger (1976) propuso una relación del tipo:

$$V_{MLW} = D \cdot \Omega^E \quad (5.3)$$

Donde V_{MLW} es el volumen (m^3) de los canales mareales con respecto al nivel de bajamar y D y E son los coeficientes de proporcionalidad.

Por su parte, Eysink (1990) hizo lo propio considerando el volumen de los canales respecto de media marea.

Finalmente, existe otra relación empírica propuesta por Eysink (1990) y Renger y Partensky (1974) que relaciona el área total de la bahía con el área de los bajos interiores y toma la siguiente forma:

$$\frac{A_f}{A_b} = 1 - F \cdot A_b^G \quad (5.4)$$

Donde A_b representa el área total de la bahía (en km^2), A_f representa el área total de los bajos interiores medidos respecto del nivel de bajamar (en km^2) y F y G son las constantes de proporcionalidad.

A partir de estas relaciones se puede deducir que la única forma de alterar la morfología de equilibrio de un estuario es actuando sobre el prisma de marea (Ω). Este parámetro (Ω) puede verse afectado tanto por la variación del nivel medio del mar ($\Delta\eta$) debida al cambio climático como por el crecimiento de la cota de los bajos interiores (α). La variación del prisma de marea en un instante dado puede expresarse del siguiente modo:

$$\Delta\Omega = (\Delta\eta - \alpha) \cdot A_f \quad (5.5)$$

Donde:

$\Delta\Omega$: incremento del prisma de marea (m^3)

$\Delta\eta$: incremento del nivel medio del mar (m)

α : incremento de cota de los bajos interiores (m)

A_f : área ocupada por los bajos interiores (m^2)

Por consiguiente, si la tasa de generación interna de sedimento es suficiente para que la cota de los bajos interiores aumente conforme se produce el aumento del nivel del mar ($\alpha = \Delta\eta$) se mantendrá el equilibrio dinámico ($\Delta\Omega = 0$). En este caso, los elementos morfológicos del estuario permanecerán inalterados. En caso contrario ($\alpha < \Delta\eta$), el prisma de marea aumentará ($\Delta\Omega > 0$) con los consiguientes efectos morfológicos asociados.

A continuación se desarrollan las expresiones que permiten evaluar dichos efectos asumiendo que área de la bahía (A_b) se mantiene constante con el aumento del nivel del mar. Esta hipótesis es admisible en los estuarios objeto de estudio debido a la confinación a la que se encuentran sometidos por la disposición de sus márgenes.

- Efecto del aumento del prisma de marea en los bajos interiores

Si el aumento de cota de los bajos interiores es menor que el aumento del nivel del mar ($\alpha < \Delta\eta$), los bajos interiores presentarán un déficit de volumen respecto a la situación de equilibrio inicial que será igual al $\Delta\Omega$ experimentado. De este modo se tiene:

$$V_f = V_{f,eq} + \Delta V_f \quad (5.6)$$

$$\Delta V_f = (\Delta\eta - \alpha) \cdot A_f$$

Donde:

V_f : volumen de sedimento contenido en los bajos interiores (m^3)

$V_{f,eq}$: volumen de equilibrio de los bajos interiores (m^3)

ΔV_f : déficit de volumen de los bajos interiores debido al $\Delta\Omega$ (m^3)

Los bajos interiores comenzarán a recuperar su equilibrio dinámico cuando la tasa del aumento de su cota supere la tasa de aumento del nivel del mar. A partir de este momento el tiempo que tardará en restablecer el equilibrio dinámico vendrá dada por la siguiente función exponencial (Agudo, 2013):

$$V_f = V_{f,eq} (1 - e^{-\alpha_r t}); \quad \alpha_r = \alpha - \Delta\eta > 0 \quad (5.7)$$

- Efecto del aumento del prisma de marea en la sección de la desembocadura

Teniendo en cuenta la relación que establece que el área de la sección crítica de la desembocadura es proporcional al prisma de marea (ecuación 5.1), se puede establecer la relación entre la variación del área de la sección crítica de la desembocadura y el aumento del nivel del mar:

$$A_{eq,act} = A \cdot \Omega_{act} \quad (5.8)$$

$$A_{eq,fut} = A \cdot (\Omega_{act} + \Delta\Omega)$$

Donde:

$A_{eq,act}$: área de la sección de equilibrio actual (m^2)

$A_{eq,fut}$: área de la sección de equilibrio futura (m^2)

Ω_{act} : prisma de marea actual (m^3)

A: coeficiente de proporcionalidad

Reagrupando términos:

$$\frac{\Delta A_{eq}}{A_{eq, act}} = \frac{A_{eq, fut} - A_{eq, act}}{A_{eq, act}} = \frac{\Delta \Omega}{\Omega_{act}} \quad (5.9)$$

$$\frac{\Delta A_{eq}}{A_{eq, act}} = \frac{(\Delta \eta - \alpha) \cdot A_f}{\Omega_{act}}$$

Donde ΔA_{eq} es la variación del área de equilibrio de la boca de la desembocadura (m^2).

Según la expresión obtenida, la variación del área de equilibrio de la bocana del estuario es directamente proporcional a la variación del prisma de marea e inversamente proporcional al prisma de marea.

- Efecto del aumento del prisma de marea en el volumen del bajo exterior

El efecto del aumento del nivel del mar en el volumen de sedimento contenido por el bajo exterior puede ser cuantificado a partir de la ecuación 5.2:

$$V_{eq, act} = B \cdot \Omega_{act}^C \quad (5.10)$$

$$V_{eq, fut} = B \cdot (\Omega_{act} + \Delta \Omega)^C$$

Donde:

$V_{eq, act}$: Volumen de equilibrio actual del bajo exterior (m^3)

$V_{eq, fut}$: Volumen de equilibrio futuro del bajo exterior (m^3)

B y C: coeficientes de proporcionalidad

Reagrupando términos:

$$\frac{\Delta V_{eq}}{V_{eq, act}} = \frac{V_{eq, fut} - V_{eq, act}}{V_{eq, act}} = \left(1 + \frac{\Delta \Omega}{\Omega_{act}}\right)^C - 1 \quad (5.11)$$

$$\frac{\Delta V_{eq}}{V_{eq, act}} = \left(1 + \frac{(\Delta \eta - \alpha) \cdot A_f}{\Omega_{act}}\right)^C - 1$$

Donde ΔV_{eq} es la variación del volumen de equilibrio del bajo exterior (m^3).

Según esta expresión, la variación del volumen del bajo exterior depende de la variación del prisma de marea del estuario, del prisma de marea actual y del coeficiente de proporcionalidad C.

- Efecto del aumento del prisma de marea en el volumen de los canales mareales

El efecto del aumento del nivel del mar en el volumen de los canales mareales se cuantifica según la siguiente formulación (véase la ecuación 5.3):

$$V_{MLW_{eq, act}} = D \cdot \Omega_{act}^E \quad (5.12)$$

$$V_{MLW_{eq, fut}} = D \cdot (\Omega_{act} + \Delta\Omega)^E$$

Donde:

$V_{MLW_{eq, act}}$: Volumen de equilibrio actual de los canales mareales respecto del nivel de bajamar (m^3)

$V_{MLW_{eq, fut}}$: Volumen de equilibrio futuro de los canales mareales respecto del nivel de bajamar (m^3)

D y E: coeficientes de proporcionalidad

Reagrupando términos:

$$\frac{\Delta V_{MLW_{eq}}}{V_{MLW_{eq, act}}} = \frac{V_{MLW_{eq, fut}} - V_{MLW_{eq, act}}}{V_{MLW_{eq, act}}} = \left(1 + \frac{\Delta\Omega}{\Omega_{act}}\right)^E - 1 \quad (5.13)$$

$$\frac{\Delta V_{MLW_{eq}}}{V_{MLW_{eq, act}}} = \left(1 + \frac{(\Delta\eta - \alpha) \cdot A_f}{\Omega_{act}}\right)^E - 1$$

Donde $\Delta V_{MLW_{eq}}$ es la variación del volumen de equilibrio de los canales mareales (m^3).

Según esta expresión, la variación del volumen de los canales mareales depende de la variación del prisma de marea del estuario, del prisma de marea actual y del coeficiente de proporcionalidad E.

El valor más adecuado de los coeficientes de proporcionalidad ha sido estudiado por diversos autores en diferentes tipos de estuarios. Hume y Herdenfort (1993) estudiaron la relación de equilibrio entre el prisma de marea (Ω) y el área de la sección crítica (A_c) en distintos tipos de estuarios situados en Nueva Zelanda. Obtuvieron que la relación $A_c = A \cdot \Omega^n$, donde A y n son constantes, puede ser aplicada a una amplia tipología de estuarios utilizando diferentes valores de los coeficientes de proporcionalidad.

La metodología propuesta consiste en aplicar las ecuaciones 5.6, 5.9, 5.11 y 5.13 para cuantificar el efecto del aumento del nivel del mar sobre los elementos morfológicos de los estuarios: bajos interiores, desembocadura, bajo exterior y canales mareales, respectivamente. Para ello es necesario desarrollar una serie de pasos. En primer lugar, con base en las batimetrías disponibles se estiman las características morfológicas actuales de los estuarios objeto de estudio: área de la sección crítica (A_c), volumen de sedimento contenido en el bajo exterior (V), volumen de los canales mareales (V_{MLW}), área de la bahía (A_b), área y volumen de los bajos interiores (A_f y V_f) y prisma de marea (Ω). A continuación, se determinan los coeficientes de proporcionalidad necesarios (C y E) por medio de curvas de ajuste entre V y V_{MLW} actuales de los estuarios y su prisma de marea (Ω). Una vez obtenidos los coeficientes de proporcionalidad, se evalúan los cambios morfológicos utilizando dichas ecuaciones.

Llegados a este punto, es necesario señalar que los resultados obtenidos al aplicar esta metodología están muy condicionados por la disponibilidad de datos batimétricos de detalle iniciales.

La figura 5.8 muestra un esquema de la metodología general propuesta.



Figura 5.8. Esquema de la metodología aplicada en este capítulo.

5.6. Datos de partida

Como se ha mencionado en el apartado 5.2.3, para aplicar los modelos de equilibrio es necesario contar con una serie de datos de partida iniciales básicos: batimetrías de detalle actuales, batimetrías históricas, datos de actuaciones antrópicas, series históricas de las dinámicas y aportes sedimentarios que permitan evaluar la tasa de crecimiento de la cota de los bajos interiores.

En el presente estudio se dispone de:

- Batimetrías actuales de detalle en zonas concretas de los estuarios.
- Datos del nivel del mar.

En los apartados siguientes se describen en detalle dichas bases de datos.

5.6.1. Batimetría

La información sobre el fondo marino es clave en cualquier estudio que involucre el análisis de las corrientes marinas. La información topográfica y batimétrica disponible en los distintos estuarios objeto de estudio procede de diversas fuentes.

Por un lado, se cuenta con información topográfica del año 2003 procedente del Visor cartográfico del Gobierno del Principado de Asturias (<http://sitpa.cartografia.asturias.es>). Estos datos permiten caracterizar la zona situada por encima del nivel medio del mar en Alicante (NMMA) en todos los estuarios.

En relación a la batimetría actual, la disponibilidad de información es diferente en función del estuario.

Estuario del Eo

La batimetría de la zona exterior se ha extraído de la carta náutica 932 del Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM).

En el interior del estuario, en la zona comprendida entre la bocana y Castropol, se cuenta con una batimetría de detalle del año 2005 proporcionada por el Servicio de Puertos e Infraestructuras del Transporte del Gobierno del Principado de Asturias. En la zona más interna del estuario, la batimetría ha sido construida con base en la información recogida en los artículos *Características dinámicas y sus relaciones sedimentarias en la ría del Eo (Galicia-Asturias, Noroeste de España)* (Flor et al. 1992) y *Aspectos morfológicos de la ría del Eo* (Flor et al. 1993).

Estuario del Navia

La batimetría en la zona exterior se ha obtenido de la carta náutica 933 del IHM.

En el interior del estuario, en un área ubicada entre la bocana del estuario y el puerto deportivo, se dispone de información batimétrica de detalle del año 2010 proporcionada por el Servicio de Puertos e Infraestructuras del Transporte del Gobierno del Principado de Asturias. Extrapolando esta información se ha estimado la cota de los canales de la zona más interna.

Estuario del Nalón

La batimetría de la zona exterior ha sido definida a partir de las cartas náuticas 934 y 935 del IHM.

En el interior del estuario, en la zona comprendida entre la bocana y el puerto de San Esteban, se cuenta con una batimetría de detalle del año 2006 proporcionada por el Servicio de Puertos e Infraestructuras del Transporte del Gobierno del Principado de Asturias. La cota de los canales situados en la zona más interna ha sido estimada por extrapolación de dicha información.

Estuario de Avilés

Para caracterizar la batimetría en la zona exterior del estuario de Avilés se ha utilizado la carta náutica 935 del IHM.

En la zona interior, se ha empleado la Carta 9350 del IHM completada con la batimetría de 1995, de la Autoridad Portuaria de Gijón y Avilés, utilizada por IHCantabria en estudios anteriores.

Estuario de Villaviciosa

La batimetría en la zona exterior del estuario ha sido definida de forma general, con ayuda de la carta náutica 936 del IHM y de modo particular, en el área comprendida entre la Punta de Rodiles y la desembocadura, con la batimetría de detalle del año 2010 proporcionada por el Servicio de Puertos e Infraestructuras del Transporte del Gobierno del Principado de Asturias. Esta batimetría permite a su vez caracterizar la parte interior comprendida entre la bocana y la zona del puerto. Por su parte, la zona más interna de los canales ha sido caracterizada con los datos registrados durante la campaña de campo

llevada a cabo por IHCantabria el 28 de noviembre de 2014 en el marco de este proyecto. Las medidas fueron tomadas con el equipo Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADP) "River Surveyor" propiedad de IHCantabria en una serie de perfiles longitudinales y transversales distribuidos a lo largo del estuario (véase la figura 5.9). Una descripción más detallada de esta campaña aparece descrita en el informe correspondiente a la tarea 1.3.



Figura 5.9. Perfiles longitudinales y transversales de medida con el equipo "River Surveyor".

Estuario de Ribadesella

La batimetría en la zona exterior ha sido elaborada a partir de la carta náutica 937 del IHM.

En el interior del estuario, en la zona comprendida entre la desembocadura del estuario y el puerto, se cuenta con una batimetría de detalle del año 2011 que ha sido proporcionada por el Servicio de Puertos e Infraestructuras del Transporte del Gobierno del Principado de Asturias. En la zona más interna del estuario, la batimetría se ha definido con base en la información recogida en el artículo *Características dinámicas y sedimentológicas del estuario de Ribadesella, Asturias, N. de España* (Flor y Cambor, 1989).

La figura 5.10 muestra, para cada estuario, la batimetría resultante de la combinación de las diferentes fuentes de datos.

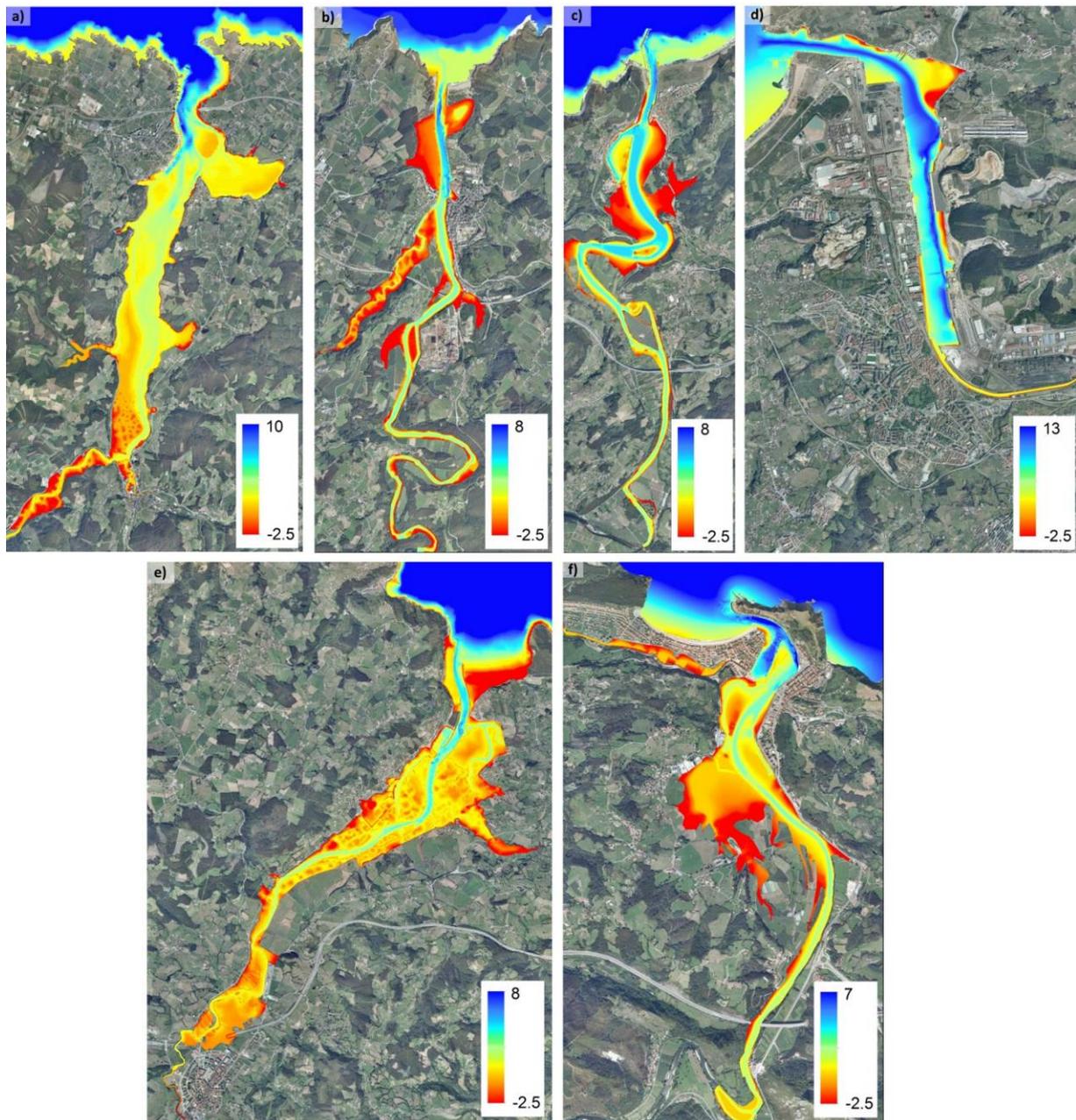


Figura 5.10. Batimetría de las zonas de estudio: a) Eo, b) Navia, c) Nalón, d) Avilés, e) Villaviciosa y f) Ribadesella (Profundidad respecto del NMM local).

5.6.2. Dinámicas marinas

Las principales dinámicas que intervienen en la evolución morfológica a largo plazo de estuarios son la marea, el oleaje y el río. En concreto, el prisma de marea, volumen de agua que entra y sale de un estuario durante los ciclos de mareas vivas, es el parámetro fundamental en los estuarios del norte de España.

La metodología planteada en el presente estudio propone evaluar el efecto del cambio climático en los estuarios objeto de estudio basándose en el empleo de formulaciones empíricas que dependen exclusivamente del prisma de marea y del área ocupada por cada estuario (área de la bahía). Por lo tanto, la dinámica considerada en este caso es la marea astronómica.

A continuación se describe la base de datos disponible de marea astronómica en la zona de estudio.

Marea astronómica

Para caracterizar la onda de marea astronómica en el exterior de los estuarios objeto de estudio se han utilizado los datos procedentes del mareógrafo de Gijón suministrados por el Área de Conocimiento del Medio Físico de Puertos del Estado.

En la figura 5.11 se muestra la red española de mareógrafos.



Figura 5.11. Red de mareógrafos. (Fuente: www.fomento.es).

5.7. Efectos previsibles del cambio climático en los estuarios

En este apartado se desarrolla cada uno de los pasos de la metodología propuesta en el apartado 5.5 aplicándolos a los estuarios de estudio.

Como la tasa de crecimiento de la cota de los bajos interiores es un parámetro desconocido, se plantea analizar el efecto del cambio climático en los estuarios en función de dicho aumento.

5.7.1. Caracterización morfológica de los estuarios

El primer paso para describir la configuración morfológica de los estuarios objeto de estudio consiste en obtener el prisma de marea (Ω) característico de cada uno. Para ello se han estimado, a partir de las batimetrías disponibles, los volúmenes contenidos entre las cotas -2 m y 2 m respecto del nivel medio del mar local (NMM).

Del mismo modo, a partir de las batimetrías disponibles, se han determinado los elementos morfológicos en los diferentes estuarios empleando los siguientes procedimientos:

- El área de la sección crítica (A_c) se ha obtenido considerando el nivel medio del mar y la batimetría existente en la bocana de cada estuario. La figura 5.12 muestra la sección obtenida en cada estuario.

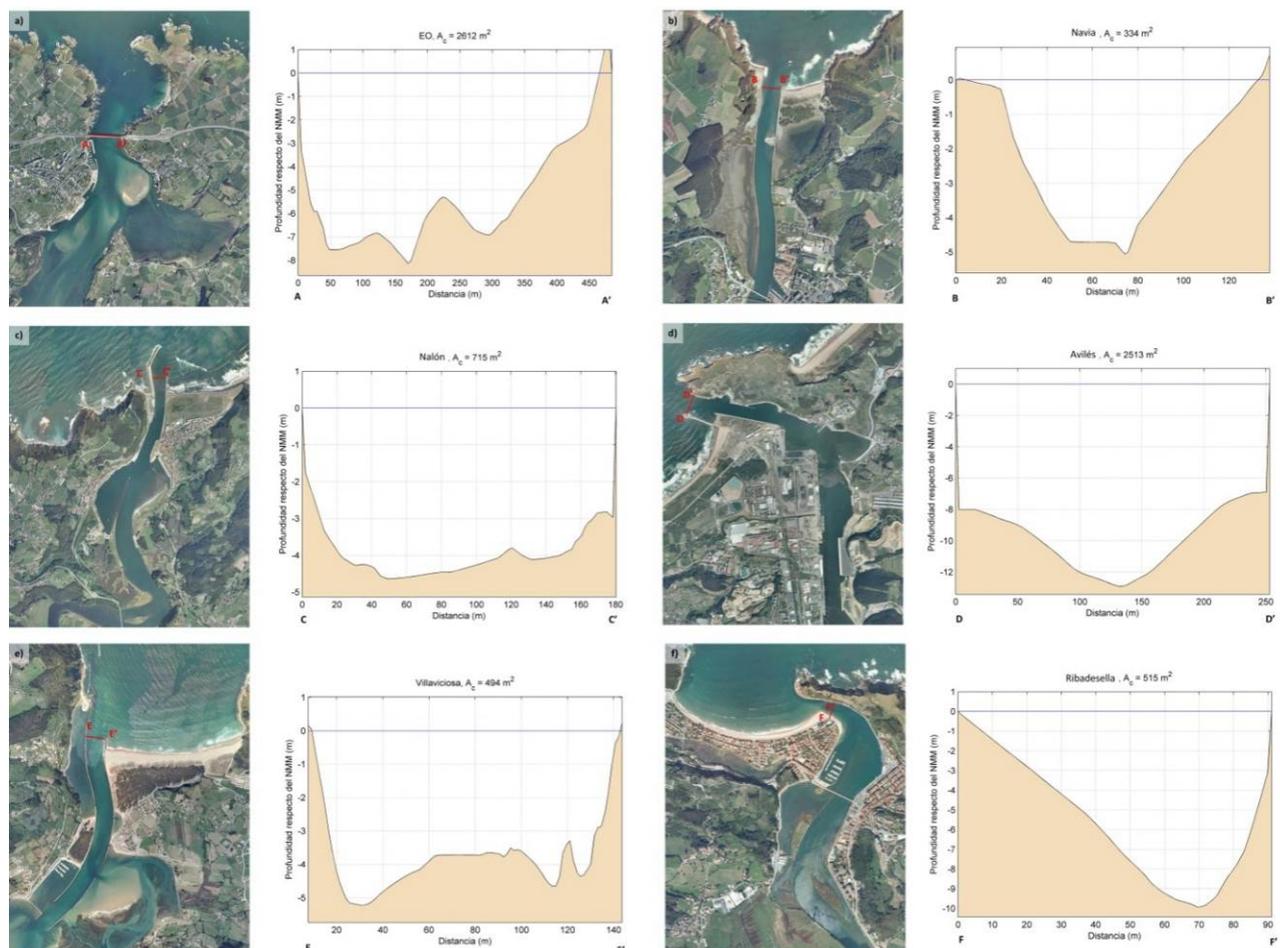


Figura 5.12. Sección de la desembocadura en: a) Eo, b) Navia, c) Nalón, d) Avilés, e) Villaviciosa y f) Ribadesella.

- El volumen del bajo exterior (V) no se ha podido obtener con precisión debido a la falta de una batimetría de detalle actualizada que permita evaluar el volumen de sedimento. Por lo tanto, se ha realizado una estimación calculada como la diferencia entre la batimetría existente y la batimetría que tendría la zona si no existiese la desembocadura. La figura 5.13 muestra, para cada estuario, la localización aproximada de los bajos exteriores.



Figura 5.13. Localización del bajo exterior: a) Eo, b) Navia, c) Nalón, d) Avilés, e) Villaviciosa y f) Ribadesella.

- El volumen de los canales mareales (V_{MLW}) se ha determinado de acuerdo a la batimetría existente respecto del nivel de bajamar de una carrera de marea viva de 4 m. La figura 5.14 muestra la zona ocupada por los canales mareales en cada estuario.

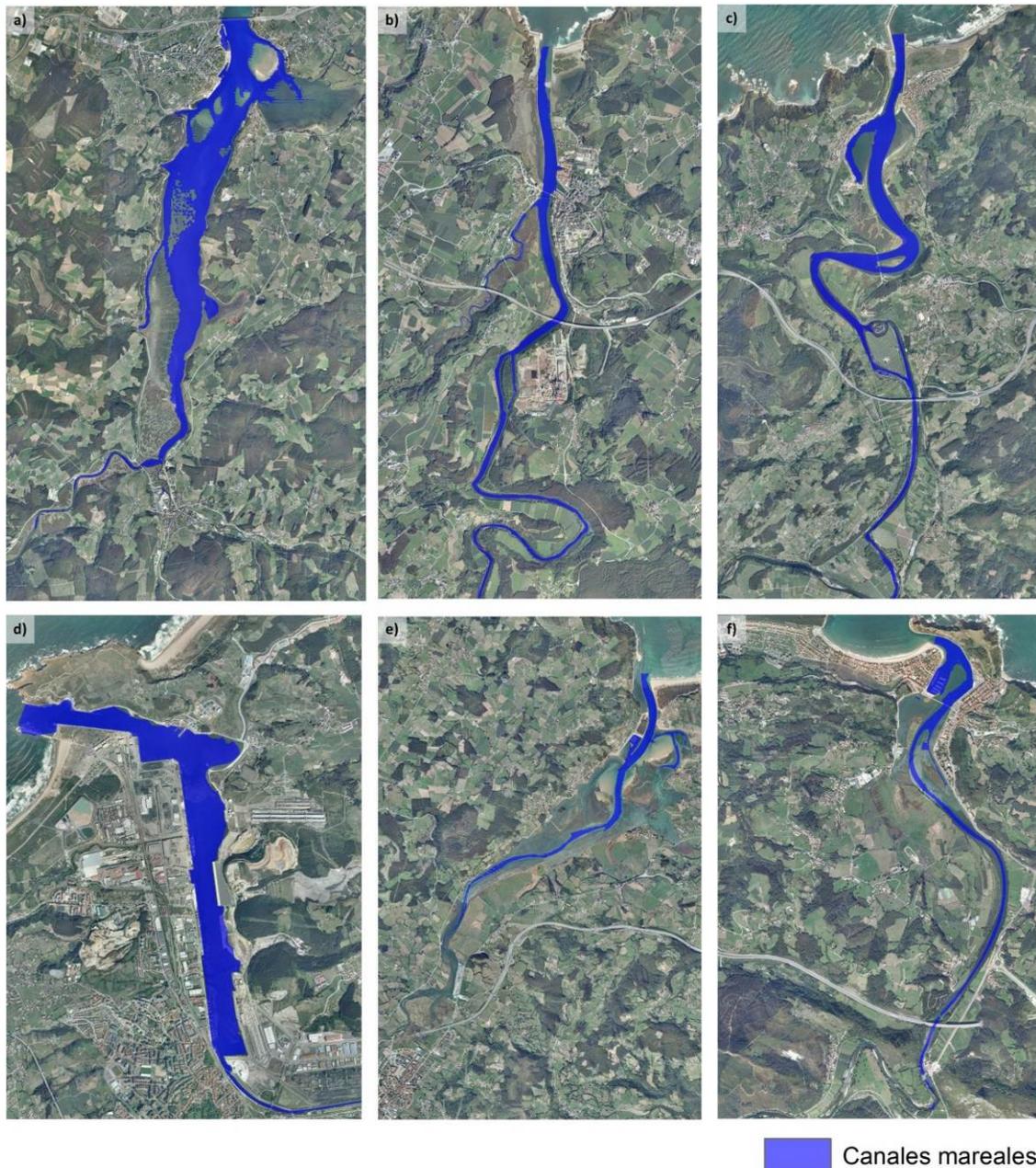


Figura 5.14. Zona ocupada por los canales mareales: a) Eo, b) Navia, c) Nalón, d) Avilés, e) Villaviciosa y f) Ribadesella.

- El área de la bahía (A_b) se ha determinado según la máxima penetración de la marea en el estuario, excluyendo las zonas que, por motivos fundamentalmente antropogénicos, han perdido su continuidad hidrodinámica original. La figura 5.15 muestra el área ocupada por la bahía en cada estuario.

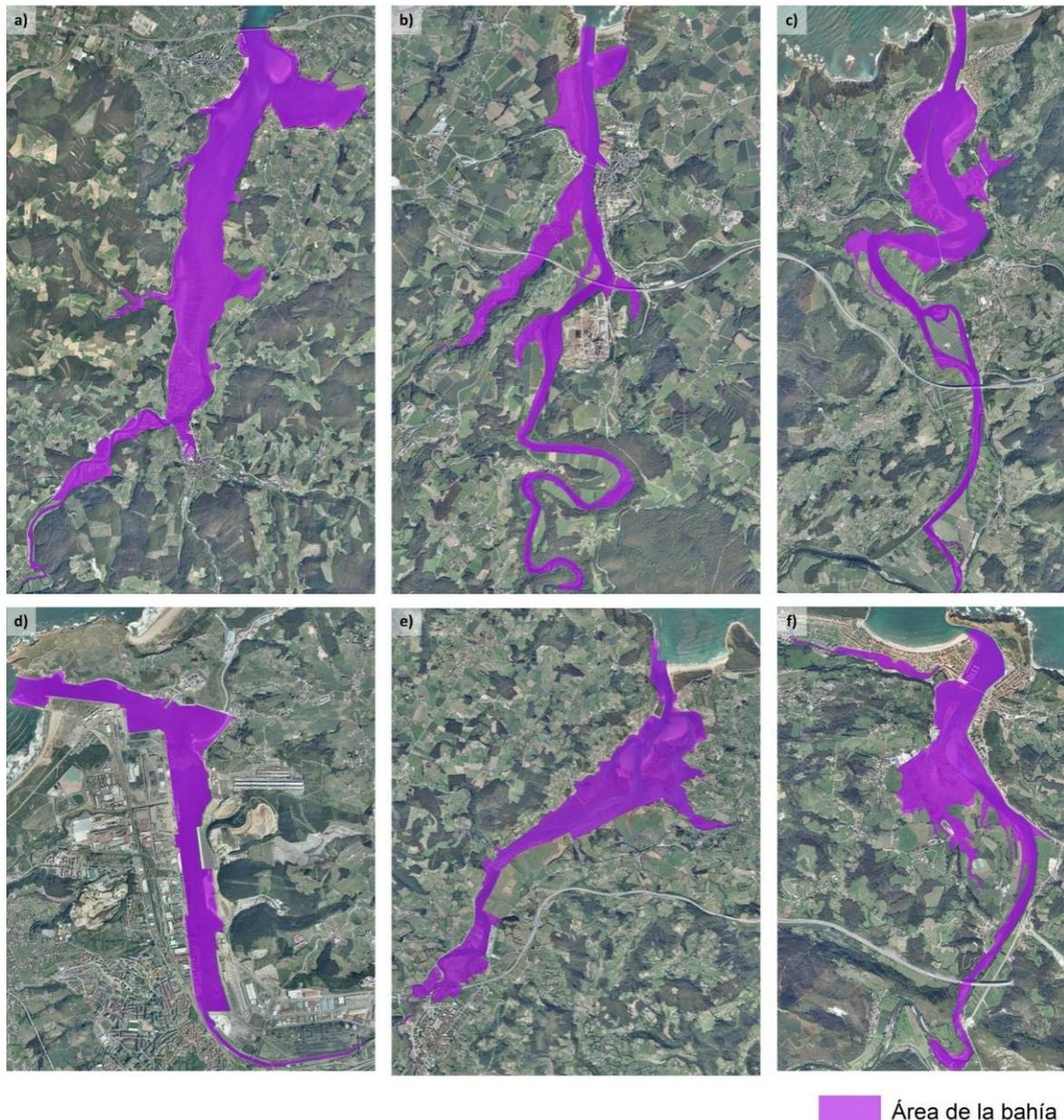


Figura 5.15. Zona ocupada por la bahía: a) Eo, b) Navia, c) Nalón, d) Avilés, e) Villaviciosa y f) Ribadesella.

- El área ocupada por los bajos interiores (A_i) se ha estimado como el área de la bahía que se encuentra por encima del nivel de bajamar de una carrera de marea viva de 4 metros. Según esta definición y con base en las batimetrías disponibles, también se ha obtenido el volumen de sedimento contenido por los bajos interiores (V_i). La figura 5.16 muestra el área ocupada por los bajos interiores en cada estuario. En el caso particular de Avilés se observa que, como consecuencia de las actuaciones humanas a las que ha sido sometido, el área ocupada por los bajos es especialmente reducida.

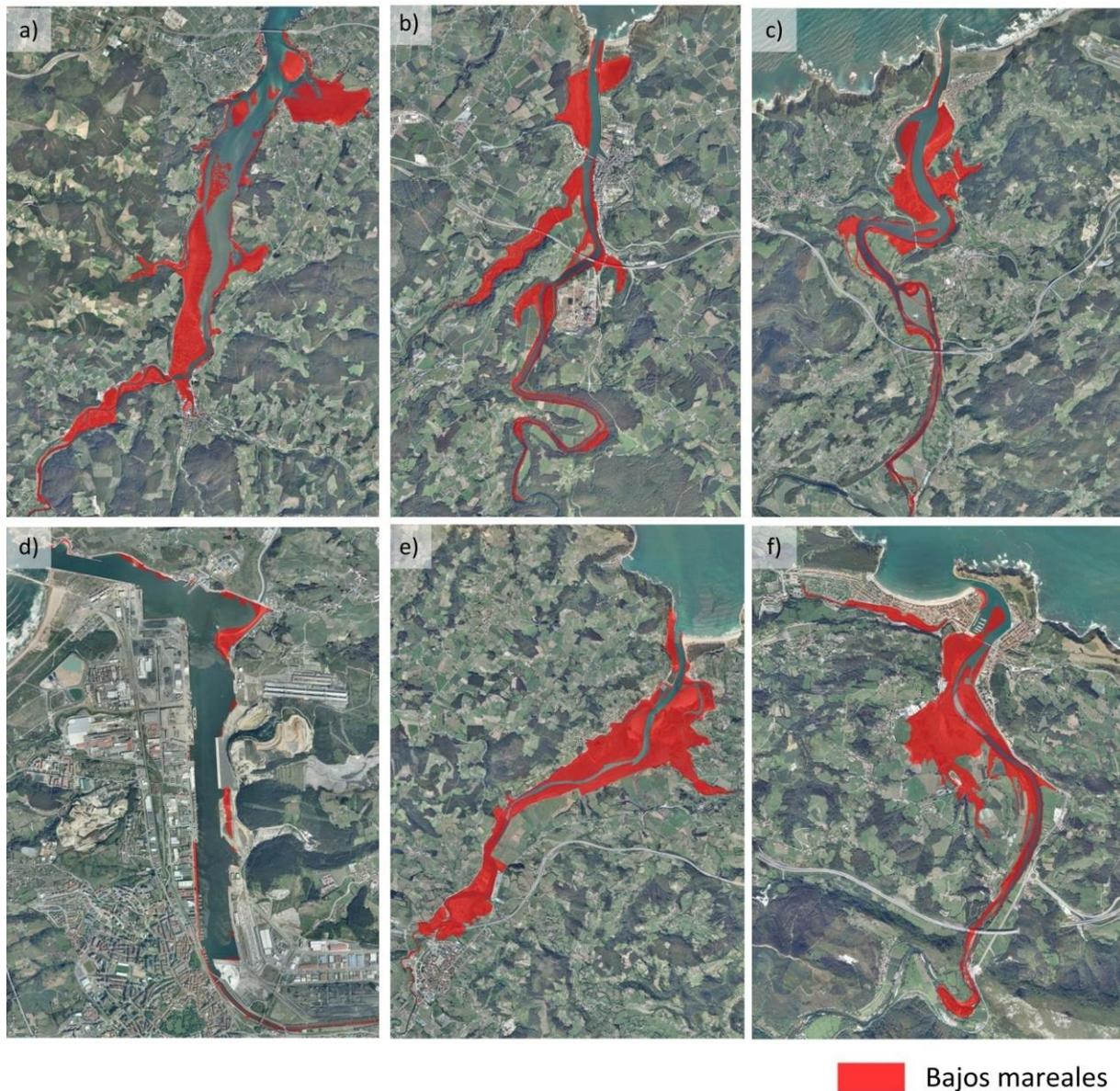


Figura 5.16. Zona ocupada por los bajos interiores: a) Eo, b) Navia, c) Nalón, d) Avilés, e) Villaviciosa y f) Ribadesella.

La tabla 5.1 recoge las estimaciones de los volúmenes y áreas de los elementos morfológicos obtenidas para los estuarios objeto de estudio.

	Eo	Navia	Nalón	Avilés	Villaviciosa	Ribadesella
Ω (m³)	32.627.190	4.080.291	8.103.594	7.542.447	8.242.661	3.111.887
A_c (m²)	2.612	334	715	2.513	494	515
V (m³)	898.876	139.139	29.793	86.825	64.700	8.292
V_{MLW} (m³)	4.796.476	882.711	2.563.398	10.263.302	611.477	361.077
A_b (m²)	10.458.135	2.287.000	3.382.000	2.047.600	4.222.740	1.532.000
A_r (m²)	6.156.775	1.697.325	2.038.050	221.825	3.741.325	1.259.825
V_r (m³)	10.505.485	5.273.576	5.672.324	545.268	9.189.225	3.053.797

Tabla 5.1. Caracterización morfológica de los estuarios asturianos (zona de estudio).

Una vez caracterizados los elementos morfológicos de los estuarios se ha estimado el valor más adecuado de los coeficientes de proporcionalidad de las ecuaciones 5.11 y 5.13, según una curva de ajuste entre los elementos morfológicos V y V_{MLW} de los estuarios y su prisma de marea (Ω). Para lograr un buen ajuste es necesario contar con datos del mayor número posible de estuarios que presentan un comportamiento similar. Por este motivo, se han incluido en el análisis, además de los estuarios asturianos en estudio, los estuarios cántabros analizados por IHCantabria en diferentes proyectos: Tina Mayor, Tina Menor, San Vicente, Oyambre, San Martín de la Arena, Pas, Ajo, Santoña y Orión. La tabla 5.2 recoge las características morfológicas V , V_{MLW} y Ω para los estuarios cántabros considerados.

	Tina Mayor	Tina Menor	San Vicente	Oyambre	San Martín de la Arena	Pas	Ajo	Santoña	Orión
Ω (m³)	1.437.579	3.177.395	12.276.423	800.000	8.500.000	4.200.000	2.140.000	52.383.210	750.000
V (m³)	227.309	26.269	8.973	3.077	791.509	128.154	7.500	4.544.540	32.690
V_{MLW} (m³)	*	302.475	*	*	*	839.000	257.809	7.896.295	*

Tabla 5.2. Caracterización morfológica de los estuarios cántabros. (* En estos estuarios el volumen de los canales mareales se midió respecto del nivel de la media marea).

5.7.2. Determinación de los coeficientes de proporcionalidad

A partir de las características morfológicas de los estuarios situados en la costa cantábrica (véanse las tablas 5.1 y 5.2) se han establecido los coeficientes de proporcionalidad de las ecuaciones 5.11 y 5.13 que mejor representan las características locales de la zona de estudio. El proceso consiste en establecer un ajuste entre los elementos morfológicos V , V_{MLW} y el prisma de marea (Ω) aplicando las relaciones empíricas descritas en el apartado anterior. La figura 5.17 muestra en color rojo las características morfológicas de los estuarios asturianos y en azul las de los estuarios cántabros.

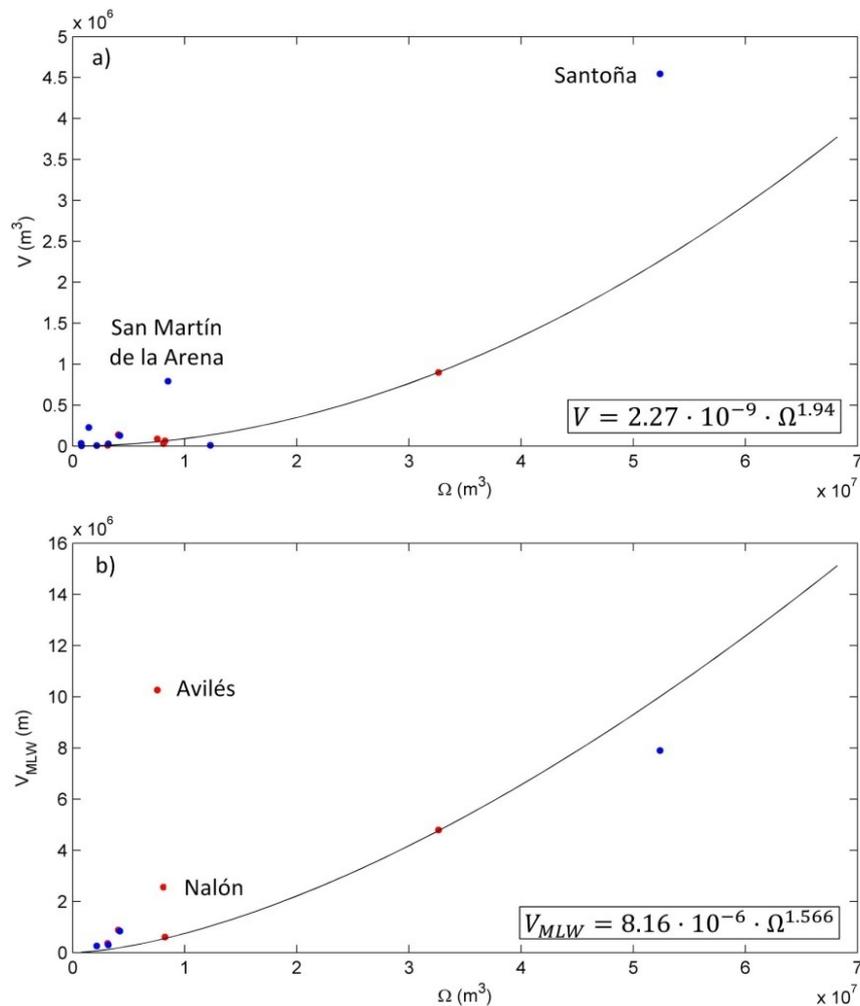


Figura 5.17. Relaciones empíricas para estuarios del Cantábrico: a) volumen del bajo exterior (V) – prisma de marea (Ω) y b) volumen de los canales mareales (V_{MLW}) – prisma de marea (Ω).

A partir del análisis realizado se ha comprobado que la relación entre el volumen del bajo exterior (V) y el prisma de marea (Ω) se ajusta a la siguiente expresión: $V = B \cdot \Omega^C$, donde V y Ω se expresan en m^3 , B toma el valor de $2,27 \cdot 10^{-9}$ y C de 1,94 (véase la figura 5.17a). Puede observarse que los estuarios que presentan un bajo exterior ubicado en una zona expuesta a los efectos del oleaje, como Santoña y San Martín de la Arena, se alejan del ajuste presentando unos volúmenes de sedimento superiores a los de equilibrio.

Para obtener la relación entre el volumen de los canales mareales (V_{MLW}) y el prisma de marea (Ω) se realiza el ajuste empleando todos los estuarios en los que se midieron los canales respecto del nivel de bajamar de una marea viva de 4 m (todos los estuarios asturianos además de Tina Menor, Pas, Ajo y Santoña de Cantabria). En la figura 5.17b puede observarse que la relación $V_{MLW} - \Omega$ se adapta a una expresión del tipo $V_{MLW} = D \cdot \Omega^E$, donde V_{MLW} y Ω están expresados en m^3 y los coeficientes de proporcionalidad D y E toman valores de $8,16 \cdot 10^{-6}$ y 1,566, respectivamente. Se observa que los estuarios de Avilés y Nalón, como consecuencia de los dragados efectuados en el interior de la bahía, presentan unos volúmenes alejados de la curva de mejor ajuste.

En la tabla 5.3 se muestra, a modo de resumen, el tipo de relación morfológica adoptada y los valores de los coeficientes que mejor representan las características locales.

Relación	Ajuste	Coef. proporcionalidad	
V - Ω	$V = B \cdot \Omega^C$	B	$2,27 \cdot 10^{-9}$
		C	1,94
$V_{MLW} - \Omega$	$V_{MLW} = D \cdot \Omega^E$	D	$8,16 \cdot 10^{-6}$
		E	1,56

Tabla 5.3. Relaciones morfológicas y coeficientes adoptados para la zona de estudio.

5.7.3. Formulaciones empíricas. Efectos del cambio climático en estuarios

Una vez obtenidos los coeficientes de proporcionalidad que intervienen en las relaciones empíricas 5.11 y 5.13, se ha estimado el efecto del aumento del nivel del mar en los elementos morfológicos de los estuarios analizados. Para ello se han asumido las siguientes hipótesis:

- El aumento del nivel del mar es la única perturbación ($\Delta\eta$).
- Debido a la configuración morfológica de los estuarios se considera que el área de la bahía (A_b) permanece constante con $\Delta\eta$.
- Debido a la intensidad de las dinámicas actuantes en la zona exterior de los estuarios y a la época en la que tuvieron lugar las actuaciones de la zona interior (finales siglo XIX y principios del XX) se asume que los estuarios parten de una situación inicial próxima al equilibrio dinámico. Esto se justifica del siguiente modo: por un lado, se ha comprobado, en actuaciones realizadas en la costa de Cantabria, que las dinámicas de la zona exterior de los estuarios son capaces de movilizar, en la escala de semanas o incluso de temporales, los volúmenes de sedimento necesarios para reestablecer el equilibrio. Por otra parte, a pesar de que los procesos del interior de los estuarios son mucho más lentos, como las actuaciones (rellenos y cierres) en el interior de los mismos tuvieron lugar a finales del siglo XIX y principios del XX, puede asumirse que ha pasado el tiempo suficiente para alcanzar de nuevo el equilibrio (Tönis et al., 2002).

Según la ecuación 5.5, si la tasa de generación interna de sedimento es suficiente para que la cota de los bajos interiores aumente conforme se produce el aumento del nivel del mar ($\alpha = \Delta\eta$), no se producirá un aumento de prisma de marea ($\Delta\Omega = 0$) y, en consecuencia, se mantendrá el equilibrio dinámico. En caso contrario ($\alpha < \Delta\eta$), el prisma de marea aumentará ($\Delta\Omega > 0$) con los consiguientes efectos morfológicos asociados. A continuación se describen los efectos morfológicos esperados en los estuarios objeto de estudio en este caso.

Efecto del aumento del prisma de marea sobre los bajos interiores

La figura 5.18 muestra, para cada estuario, la relación entre el déficit de volumen de los bajos interiores debido al incremento de prisma de marea y el volumen de equilibrio actual ($\Delta V_r / V_{f_{eq,act}}$) en función de la diferencia entre el aumento del nivel del mar y el incremento de las cotas de los bajos interiores ($\Delta\eta - \alpha$) (véase la ecuación 5.6).

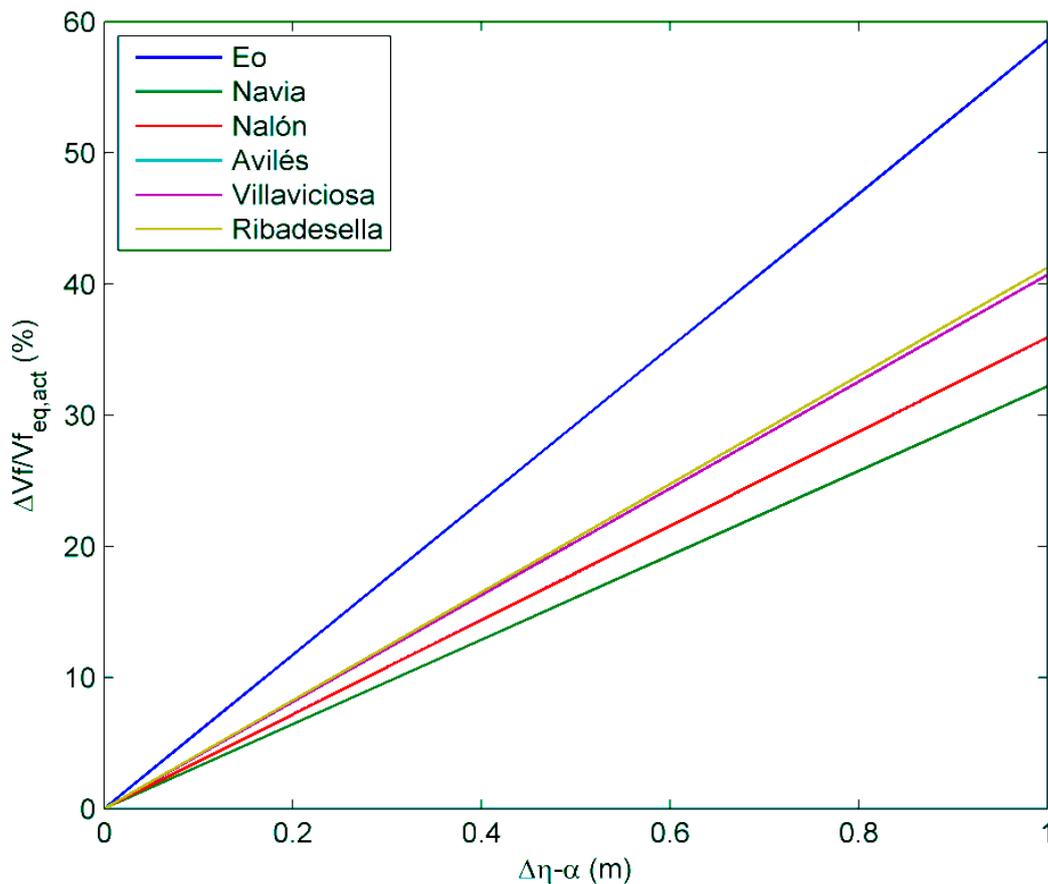


Figura 5.18. Relación entre el déficit de volumen de los bajos interiores debido al incremento de prisma de marea y el volumen de equilibrio actual ($\Delta V_f/V_{f,eq,act}$) en función de la diferencia entre el aumento del nivel del mar y el incremento de las cotas de los bajos interiores ($\Delta\eta - \alpha$).

Puede observarse que a medida que aumenta la diferencia entre $\Delta\eta$ y α se incrementa el déficit de volumen de los bajos interiores, o dicho de otra forma, para un incremento de nivel dado, cuanto mayor sea el crecimiento de la cota de los bajos interiores más cerca estarán los bajos interiores de su posición de equilibrio. Del mismo modo, puede deducirse que, en el caso de que se permitiese evolucionar a los estuarios hasta su estado de equilibrio, los bajos interiores de Eo experimentarían un mayor porcentaje de cambio, seguidos por los de Ribadesella, Villaviciosa, Avilés, Nalón y Navia.

Llegados a este punto, cabe señalar que el sedimento necesario para aumentar la cota de los bajos interiores procederá fundamentalmente del río, siempre y cuando este no se encuentre regulado por presas o embalses, y de la redistribución de sedimento en el interior del estuario.

Los bajos interiores comenzarán a recuperar su equilibrio dinámico cuando la tasa del aumento de la cota de los bajos interiores supere la tasa de aumento del nivel del mar. A partir de este momento el tiempo que tardarán en reestablecer el equilibrio dinámico se expresa según la ecuación 5.7. En la figura 5.19 se representa de forma gráfica la evolución temporal de la relación entre el volumen de los bajos interiores y su volumen de equilibrio ($V_f/V_{f,eq}$) en función de la diferencia entre la tasa de aumento de la cota de los bajos interiores y la tasa de aumento del nivel medio del mar ($\alpha_r = \alpha - \Delta\eta$).

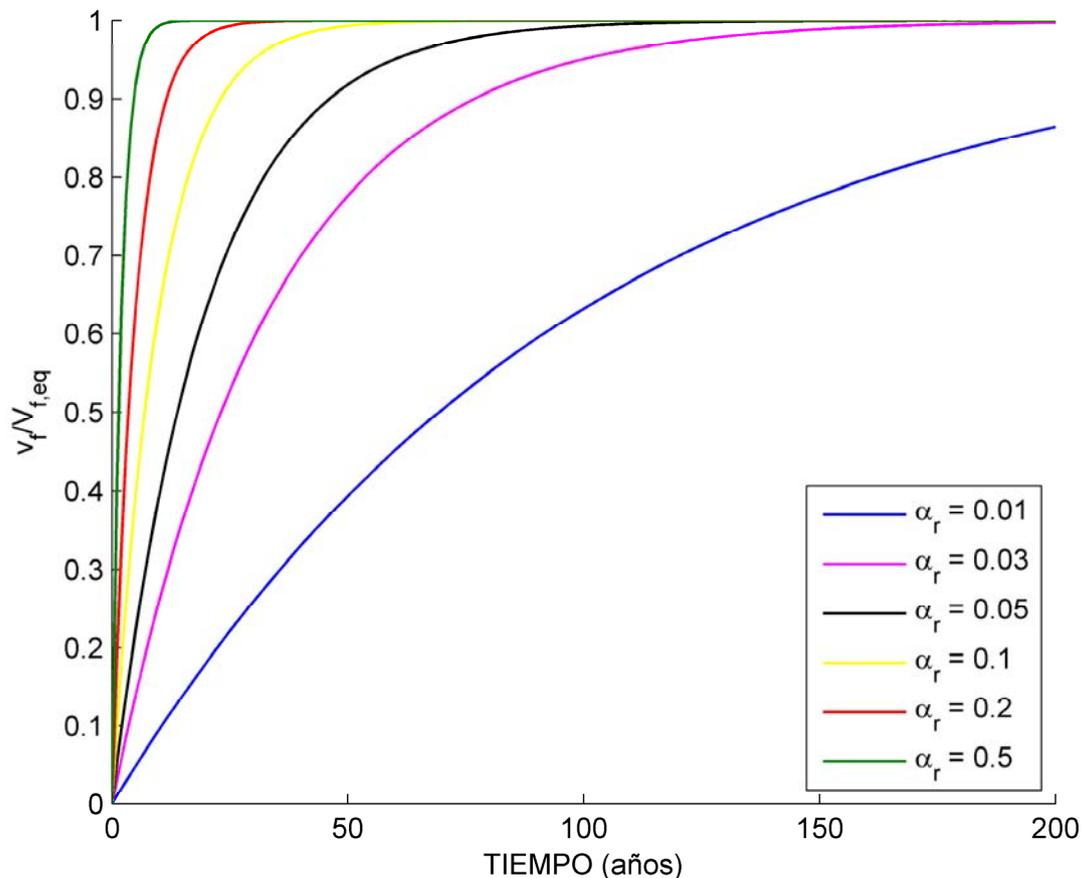


Figura 5.19. Evolución del volumen de sedimento contenido por los bajos interiores en función del tiempo y de la diferencia entre la tasa de crecimiento de las cotas de los bajos interiores y la tasa de aumento del nivel del mar (α_r).

Como puede observarse, a medida que aumenta el parámetro α_r menor es el tiempo necesario para que los bajos interiores restablezcan el equilibrio dinámico con las correspondientes condiciones hidrodinámicas. Hasta que los bajos interiores no restablezcan el equilibrio dinámico, se producirá un incremento en el prisma de marea ($\Delta\Omega$) que afectará a la configuración de la desembocadura, de los bajos exteriores y de los canales mareales.

Efecto del aumento del prisma de marea en la sección de la desembocadura

La figura 5.20 representa, según la ecuación 5.9, la relación entre el incremento del área experimentado por la bocana de los estuarios y sus áreas de equilibrio actual ($\Delta A_{eq}/A_{eq,act}$) en función de la diferencia entre el aumento del nivel del mar y el incremento de las cotas de los bajos interiores ($\Delta\eta - \alpha$).

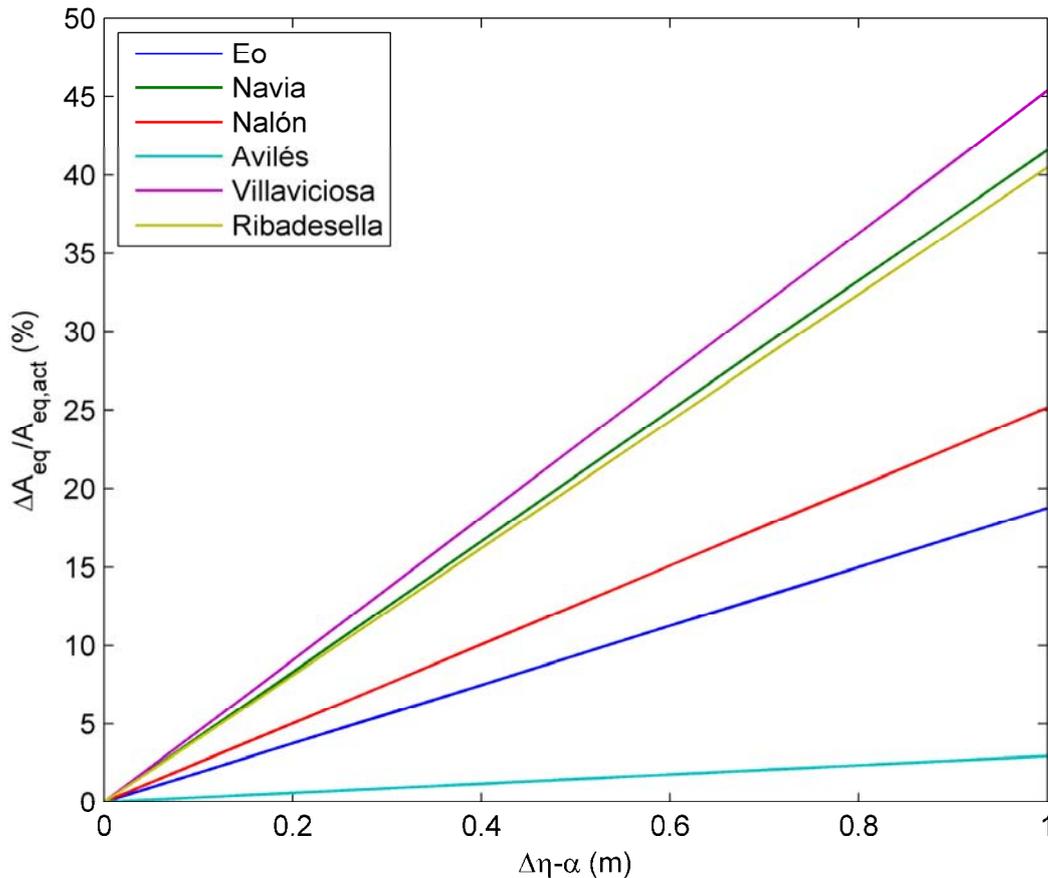


Figura 5.20. Relación entre el incremento del área de equilibrio de la desembocadura y el área de equilibrio actual ($\Delta A_{eq}/A_{eq,act}$) en función de la diferencia entre el aumento del nivel del mar y el aumento de las cotas de los bajos interiores ($\Delta\eta - \alpha$).

Se observa que a medida que aumenta la diferencia entre $\Delta\eta$ y α , y consecuentemente el prisma de marea, aumenta la sección de equilibrio de la bocana. A la vista de los resultados, también puede deducirse que las áreas de las desembocaduras de los estuarios Villaviciosa, Navia y Ribadesella serán las que experimenten un mayor porcentaje de cambio, mientras que la de Avilés será la que menos.

Efecto del aumento del prisma de marea en el volumen del bajo exterior

La figura 5.21 muestra, de acuerdo a la ecuación 5.11, la relación entre el incremento de volumen de equilibrio del bajo exterior y el volumen de equilibrio actual ($\Delta V_{eq}/V_{eq,act}$) de los distintos estuarios analizados en función de la diferencia entre el aumento del nivel del mar y el incremento de las cotas de los bajos interiores ($\Delta\eta - \alpha$).

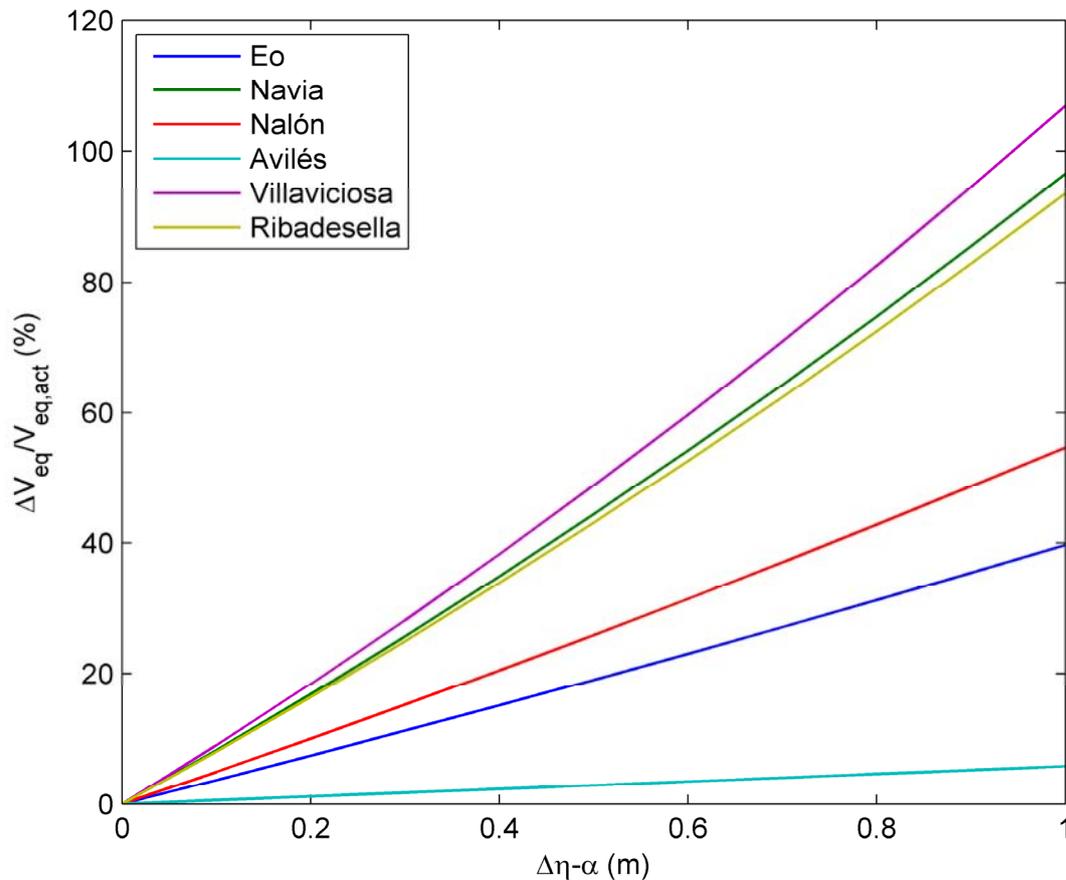


Figura 5.21. Relación entre el incremento de volumen de equilibrio del bajo exterior y el volumen de equilibrio actual ($\Delta V_{eq}/V_{eq,act}$) en función de la diferencia entre el aumento del nivel del mar y el incremento de las cotas de los bajos interiores ($\Delta\eta - \alpha$).

Tal como indica la figura, cuanto mayor es la diferencia entre $\Delta\eta$ y α , mayor es la variación del volumen de equilibrio del bajo exterior. En este caso, el mayor porcentaje de cambio se producirá en los bajos exteriores de los estuarios de Villaviciosa, Navia y Ribadesella y el menor se producirá en el de Avilés.

Del mismo modo que el origen de sedimento de los bajos interiores es fundamentalmente fluvial, en el caso de los bajos exteriores procederá principalmente de la playa adyacente produciendo la erosión de la misma.

Efecto del aumento del prisma de marea en el volumen de los canales mareales

La figura 5.22 muestra, para cada estuario, la relación entre el incremento de volumen de equilibrio de los canales mareales y el volumen de equilibrio de la situación actual ($\Delta V_{MLW_{eq}}/V_{MLW_{eq,act}}$) en función de la diferencia entre el aumento del nivel del mar y el incremento de las cotas de los bajos interiores ($\Delta\eta - \alpha$) (véase la ecuación 5.13).

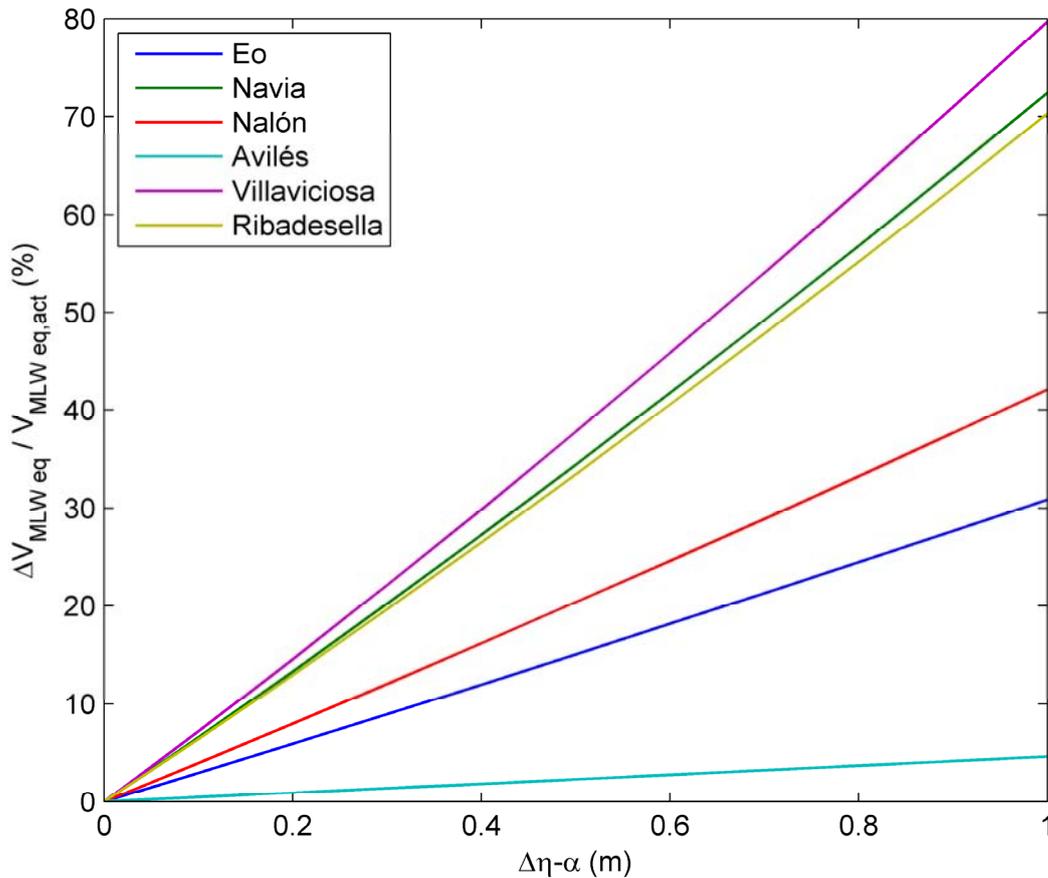


Figura 5.22. Relación entre el incremento del volumen de equilibrio de los canales mareales y el volumen de equilibrio actual ($\Delta V_{MLW\ eq} / V_{MLW\ eq, act}$) en función de la diferencia entre el aumento del nivel del mar y el incremento de las cotas de los bajos interiores ($\Delta\eta - \alpha$).

Se observa que a medida que aumenta la diferencia entre $\Delta\eta$ y α , mayor es la variación del volumen de equilibrio de los canales mareales afectando en un porcentaje mayor a los canales de Villaviciosa, Navia y Ribadesella.

Estimación de los efectos para los años horizonte 2050 y 2100

En el apartado anterior se han estimado los efectos del cambio climático en los bajos interiores, en la desembocadura, en el bajo exterior y en las canales mareales en función de las variables $\Delta\eta$ y α . A continuación, para intentar dar unos valores aproximados de estos cambios en los años horizonte 2050 y 2100, se han asumido las siguientes hipótesis:

- La tasa de incremento del nivel medio del mar ($\Delta\eta$) es variable y en este estudio se ha definido, según la expresión propuesta por van der Wegen (2013), imponiendo un aumento de 1 m a los 100 años (véase la figura 5.23). Este aumento queda del lado de la seguridad ya que el escenario de cambio climático definido por el IPCC (2014) más pesimista (RCP8.5) prevé un incremento máximo de 0,82 m para el periodo 2081-2100.

- Se aplica como tasa de aumento medio de las cotas de los bajos interiores (α), para todos los estuarios, la obtenida al aplicar modelado de procesos en Villaviciosa (véase el documento de la tarea 1.3).

La figura 5.23 muestra las variaciones temporales del incremento del nivel del mar y de aumento de la cota de los bajos interiores asumidas en este apartado. Según estas hipótesis, la diferencia entre el aumento del nivel del mar ($\Delta\eta$) y el aumento de la cota de los bajos interiores (α) será en torno a 0,2 m y 0,75 m para los años horizonte 2050 y 2100, respectivamente.

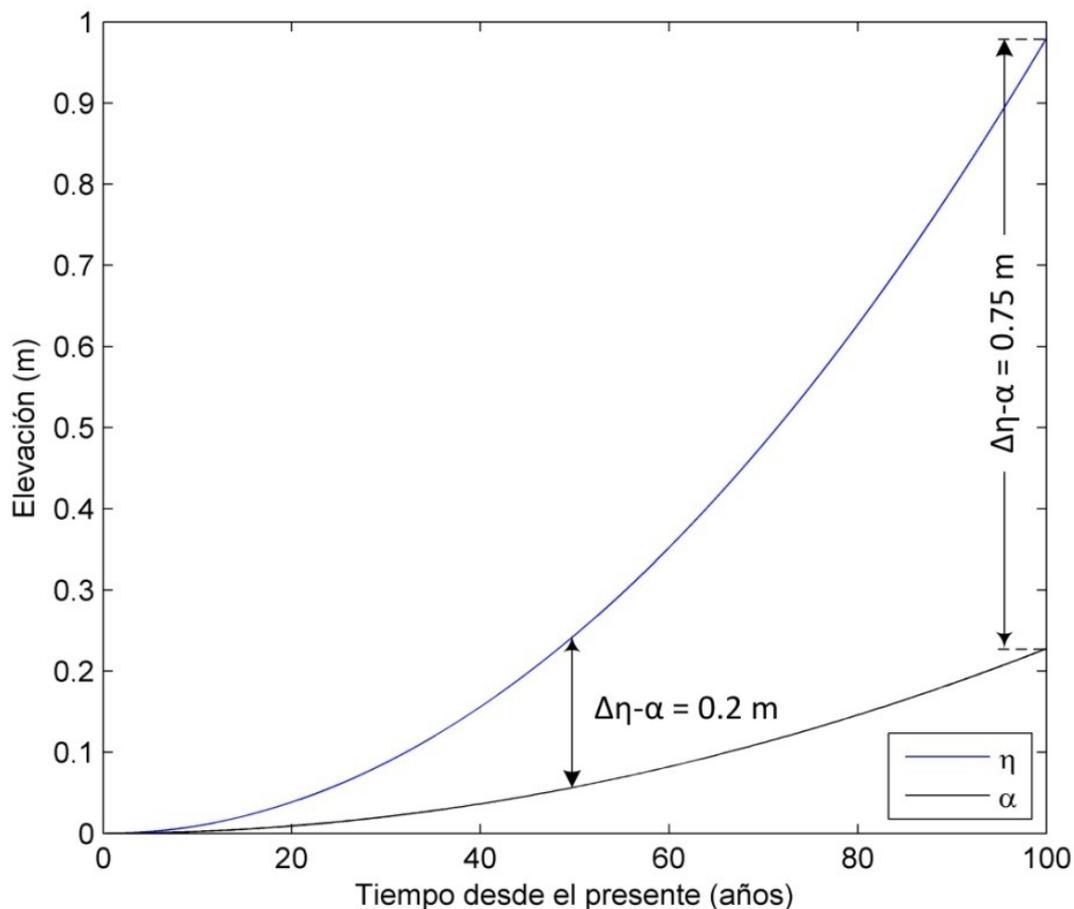


Figura 5.23. Incrementos de nivel del mar y de la cota de los bajos interiores asumidos en el presente análisis.

Con estas hipótesis se ha elaborado la tabla 5.4 en la que se detallan las características morfológicas actuales de los estuarios analizados y los efectos estimados en función de las diferencias entre el aumento del nivel medio del mar y el incremento de cota de los bajos interiores asumidas para los años horizonte 2050 y 2100. Asimismo, puesto que no hay que olvidar que los valores considerados de $\Delta\eta$ y α son estimaciones basadas en los resultados de la aplicación de modelado numérico en un solo estuario (Villaviciosa), se muestra la localización a lo largo del documento de las gráficas que permiten estimar estos cambios para distintos valores de estas dos variables.

Características morfológicas	Efectos morfodinámicos [%]	Año 2050 $\Delta\eta$ - $\alpha=0.20$ m	Año 2100 $\Delta\eta$ - $\alpha=0.75$ m	Figuras
Eo $\Omega = 32.6 \cdot 10^6$ m ³ $A_b = 10.5 \cdot 10^6$ m ³ $A_f = 615.7 \cdot 10^4$ m ² $V_f = 1050.5 \cdot 10^4$ m ³ $A_c = 2612$ m ² $V = 89.9 \cdot 10^4$ m ³ $V_{MLW} = 479.6 \cdot 10^4$ m ³	Déficit de volumen de los bajos interiores ($\Delta V_f/V_{f,eq,act}$)	11,7	44,0	Fig. 5.18
	Incremento de la sección crítica de la desembocadura ($\Delta A_{eq}/A_{eq,act}$)	3,7	14,0	Fig. 5.20
	Incremento del volumen del bajo exterior ($\Delta V_{eq}/V_{eq,act}$)	7,4	29,1	Fig. 5.21
	Incremento del volumen de los canales mareales ($\Delta V_{MLW,eq}/V_{MLW,eq,act}$)	5,9	22,9	Fig. 5.22
Navia $\Omega = 4.1 \cdot 10^6$ m ³ $A_b = 2.3 \cdot 10^6$ m ³ $A_f = 169.7 \cdot 10^4$ m ² $V_f = 527.4 \cdot 10^4$ m ³ $A_c = 334$ m ² $V = 13.9 \cdot 10^4$ m ³ $V_{MLW} = 88.3 \cdot 10^4$ m ³	Déficit de volumen de los bajos interiores ($\Delta V_f/V_{f,eq,act}$)	6,4	24,1	Fig. 5.18
	Incremento de la sección crítica de la desembocadura ($\Delta A_{eq}/A_{eq,act}$)	8,3	31,2	Fig. 5.20
	Incremento del volumen del bajo exterior ($\Delta V_{eq}/V_{eq,act}$)	16,8	69,5	Fig. 5.21
	Incremento del volumen de los canales mareales ($\Delta V_{MLW,eq}/V_{MLW,eq,act}$)	13,3	53,0	Fig. 5.22
Nalón $\Omega = 8.1 \cdot 10^6$ m ³ $A_b = 3.4 \cdot 10^6$ m ³ $A_f = 203.8 \cdot 10^4$ m ² $V_f = 567.2 \cdot 10^4$ m ³ $A_c = 715$ m ² $V = 3 \cdot 10^4$ m ³ $V_{MLW} = 256.3 \cdot 10^4$ m ³	Déficit de volumen de los bajos interiores ($\Delta V_f/V_{f,eq,act}$)	7,2	26,9	Fig. 5.18
	Incremento de la sección crítica de la desembocadura ($\Delta A_{eq}/A_{eq,act}$)	5,0	18,9	Fig. 5.20
	Incremento del volumen del bajo exterior ($\Delta V_{eq}/V_{eq,act}$)	10,0	39,9	Fig. 5.21
	Incremento del volumen de los canales mareales ($\Delta V_{MLW,eq}/V_{MLW,eq,act}$)	8,0	31,1	Fig. 5.22
Avilés $\Omega = 7.5 \cdot 10^6$ m ³ $A_b = 2 \cdot 10^6$ m ³ $A_f = 22.2 \cdot 10^4$ m ² $V_f = 54.5 \cdot 10^4$ m ³ $A_c = 2513$ m ² $V = 8.7 \cdot 10^4$ m ³ $V_{MLW} = 1026.3 \cdot 10^4$ m ³	Déficit de volumen de los bajos interiores ($\Delta V_f/V_{f,eq,act}$)	8,1	30,5	Fig. 5.18
	Incremento de la sección crítica de la desembocadura ($\Delta A_{eq}/A_{eq,act}$)	0,6	2,2	Fig. 5.20
	Incremento del volumen del bajo exterior ($\Delta V_{eq}/V_{eq,act}$)	1,1	4,3	Fig. 5.21
	Incremento del volumen de los canales mareales ($\Delta V_{MLW,eq}/V_{MLW,eq,act}$)	0,9	3,5	Fig. 5.22
Villaviciosa $\Omega = 8.2 \cdot 10^6$ m ³ $A_b = 4.2 \cdot 10^6$ m ³ $A_f = 374.1 \cdot 10^4$ m ² $V_f = 918.9 \cdot 10^4$ m ³ $A_c = 494$ m ² $V = 6.5 \cdot 10^4$ m ³ $V_{MLW} = 61.1 \cdot 10^4$ m ³	Déficit de volumen de los bajos interiores ($\Delta V_f/V_{f,eq,act}$)	8,1	30,5	Fig. 5.18
	Incremento de la sección crítica de la desembocadura ($\Delta A_{eq}/A_{eq,act}$)	9,0	34,0	Fig. 5.20
	Incremento del volumen del bajo exterior ($\Delta V_{eq}/V_{eq,act}$)	18,4	76,7	Fig. 5.21
	Incremento del volumen de los canales mareales ($\Delta V_{MLW,eq}/V_{MLW,eq,act}$)	14,6	58,2	Fig. 5.22
Ribadesella $\Omega = 3.1 \cdot 10^6$ m ³ $A_b = 1.5 \cdot 10^6$ m ³ $A_f = 126 \cdot 10^4$ m ² $V_f = 305.4 \cdot 10^4$ m ³ $A_c = 515$ m ² $V = 0.8 \cdot 10^4$ m ³ $V_{MLW} = 36.1 \cdot 10^4$ m ³	Déficit de volumen de los bajos interiores ($\Delta V_f/V_{f,eq,act}$)	8,2	30,9	Fig. 5.18
	Incremento de la sección crítica de la desembocadura ($\Delta A_{eq}/A_{eq,act}$)	8,1	30,4	Fig. 5.20
	Incremento del volumen del bajo exterior ($\Delta V_{eq}/V_{eq,act}$)	16,3	67,4	Fig. 5.21
	Incremento del volumen de los canales mareales ($\Delta V_{MLW,eq}/V_{MLW,eq,act}$)	13,0	51,5	Fig. 5.22

Tabla 5.4. Estimación de los efectos morfológicos de los estuarios en los años horizonte 2050 y 2100.

A modo de ejemplo, se detallan los efectos esperados en Avilés y Villaviciosa para los años horizonte 2050 y 2100:

- Los bajos interiores presentarán un déficit sedimentario respecto al equilibrio que tenderán a recuperar aumentando su cota (d). Según la ecuación 5.6, el aumento necesario para llegar al equilibrio es: (1) en Avilés ($V_{f\text{ eq,act}} \sim 545.268 \text{ m}^3$) del 8,1 % y 30,5 % para los años horizonte 2050 y 2100, respectivamente, y (2) en Villaviciosa ($V_{f\text{ eq,act}} \sim 9.189.225 \text{ m}^3$) del 8,1 % y 30,5 %.
- La desembocadura tenderá a incrementar su sección crítica hasta alcanzar un nuevo estado equilibrio. Haciendo uso de la ecuación 5.9 se ha previsto que el aumento necesario para alcanzar este nuevo equilibrio es: (1) en el estuario Avilés ($A_{\text{eq,act}} \sim 2.513 \text{ m}^2$), del 0,6 % y 2,2 % para los años horizonte 2050 y 2100, respectivamente y, (2) en Villaviciosa ($A_{\text{eq,act}} \sim 494 \text{ m}^2$), del 9 % y 34 %.
- En el bajo exterior se generará un déficit de volumen que tenderá a compensarse para reestablecer la condición de equilibrio dinámico. Según la ecuación 5.11, el aumento necesario para llegar al equilibrio es: (1) en Avilés ($V_{\text{eq,act}} \sim 86.825 \text{ m}^3$) del 1,1 % y 4,3 % para los años 2050 y 2100, respectivamente, y (2) en Villaviciosa ($V_{\text{eq,act}} \sim 64.700 \text{ m}^3$) del 18,4 % y 76,7 %.
- En los canales mareales el volumen tenderá a aumentar hasta alcanzar un nuevo equilibrio dinámico. Aplicando la ecuación 5.13 se ha estimado el aumento necesario para alcanzar la nueva situación de equilibrio: (1) en Avilés ($V_{\text{MLW eq,act}} \sim 10.263.302 \text{ m}^3$) es del 0,9 % y 3,5 % para los años horizonte 2050 y 2100, respectivamente, y (2) en Villaviciosa ($V_{\text{MLW eq,act}} \sim 611.477 \text{ m}^3$) del 14,6 % y 58,2 %.

6. CONCLUSIONES

A lo largo de la Tarea 2.4 se han caracterizado los impactos del cambio climático en la costa del Principado de Asturias: inundación costera, erosión en playas y cambios en las características morfológicas de los estuarios.

6.1. Inundación

De metodología propuesta para analizar la inundación costera a lo largo del litoral asturiano destacan los siguientes puntos clave:

- Debido a la doble dimensión del impacto, se ha tenido en cuenta la inundación de eventos extremos durante un tiempo determinado y la pérdida permanente de terrenos por ascenso del nivel medio del mar.
- Dado que no se ha obtenido información contrastada sobre el régimen de precipitaciones y los datos de caudal de los que se ha dispuesto no son suficientes para llevar a cabo un tratamiento estadístico al nivel del realizado en el caso de las dinámicas costeras, no ha sido posible plantear escenarios con combinaciones estadísticas de ambos.
- La caracterización costera se ha llevado a cabo mediante un índice de nivel del mar total (denominado TWL de sus siglas en inglés), definido como la suma lineal de la MM, la MA y el set-up del oleaje, calculado mediante la formulación de Stockdon y calibrado con datos de campo obtenidos por IHCantabria. En el caso particular de los puertos, se ha tenido en cuenta la difracción.

Los resultados presentados están sujetos, principalmente a dos limitaciones:

- Pese a que la calidad del MDT del que se ha dispuesto es buena, se han encontrado deficiencias en la definición de defensas costeras y encauzamientos de los ríos. Se ha podido mejorar la calidad sólo de aquellas zonas críticas de las que se ha dispuesto de planos o datos cartográficos, como es el caso de las defensas costeras.
- En lo que respecta a los resultados en playas urbanas, cabe indicar que, dada su casuística, sería necesario realizar un estudio de detalle muy específico para cada una de ellas y modelar con muy alta resolución la interacción entre el flujo y la estructura.

A continuación, se muestran las principales conclusiones que pueden extraerse:

- En Navia se observa la pérdida de terrenos en zonas bajas debido, principalmente, al aumento del nivel medio del mar, alcanzando el núcleo urbano en los escenarios que combinan el incremento de nivel con periodos de retorno elevados.
- En Luarca es la combinación del evento extremo de 100 años de periodo de retorno y el aumento del nivel medio del mar lo que hace que se produzca rebase en las dársenas y el desbordamiento del río cerca de la desembocadura.
- En San Esteban de Previa - San Juan de la Arena las zonas sufren inundaciones en el clima actual debido a eventos extremos. El incremento del nivel medio del mar aumenta sustancialmente el área inundada.

- En el caso de Avilés, el MDT no representaba adecuadamente el encauzamiento de la ría, por ello, y en la medida de lo posible, en base a las cotas topográficas de las que se ha podido disponer, se ha redefinido. Asumiendo estas modificaciones, los resultados demuestran que es la combinación de periodos de retorno elevados con aumentos considerables del nivel medio del mar lo que provocará el desbordamiento de la ría.
- El Puerto de Gijón no está expuesto a inundaciones a excepción del dique de Aboño, que el caso de combinar periodos de retorno elevados con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m, podrá verse afectado.
- La inundación en Ribadesella se produce principalmente por aumento del nivel medio del mar, con desbordamientos importantes ya a mitad de siglo, para un incremento de nivel de 0.24 m.
- En hectáreas inundadas, los concejos más afectados son Castropol y Villaviciosa, superando éste último las 680 hectáreas afectadas para el escenario más pesimista. Los concejos con menos hectáreas inundadas son Caravia, Carreño y El Franco.
- Sólo por inundación permanente se perdería casi el 1,2% del área total del Principado de Asturias.
- La diferencia entre el porcentaje de área afectada en los escenarios asociados al cuantil de 100 años de periodo de retorno y los asociados al de 500 años oscila entre el 0.004% y el 0.33% en función del escenario y el concejo. Se puede observar cómo, en el caso de Avilés, la mayor diferencia se produce para los escenarios de 0.45 m de aumento del nivel medio del mar de 0.45 m, pues con ese nivel medio el aumento de periodo de retorno propicia el desbordamiento de la ría por la margen izquierda.

6.2. Erosión

Este estudio se ha centrado en análisis de los procesos litorales transversales asumiendo que son aquellos que rigen las variaciones estacionales e interanuales de la mayoría de playas de la costa del Principado de Asturias, lo que debe realizarse de un modo aproximado dada su complejidad.

Para una buena interpretación de los resultados cabe puntualizar dos aspectos importantes:

- El estudio de la erosión de playas es un problema complicado y específico de cada playa. Influyen las características físicas del sedimento, las condiciones locales del oleaje y la batimetría, la orientación y la configuración de la costa. No obstante, este estudio muestra la variabilidad de las playas asturianas así como los efectos que el cambio climático conllevará ante la inacción.
- Los resultados que se muestran a continuación son muy conservadores pues, a falta de datos de campo, ha necesario asumir ciertas hipótesis simplificadoras como suponer todas las playas encajadas, el tamaño del grano homogéneo en cada una de ellas, la altura de berma constante y la conservación del sedimento en el sistema. Por otro lado, y especialmente tras los últimos temporales marítimos, la anchura media de playa empleada está sobreestimada. Por ello, para analizar cada playa en

detalle sería necesario un estudio específico con campañas batimétricas que queda fuera del alcance de este trabajo.

En base a los resultados obtenidos, se pueden extraer las conclusiones que se presentan a continuación:

- Tras los temporales acontecidos en febrero de 2014, las playas no tuvieron tiempo para recuperarse y la erosión a la que se llegó tras el evento ocurrido en marzo fue la acumulada de todo el invierno. La recuperación fue algo más lenta en la playa de San Lorenzo que en Navia o Salinas.
- Dado que en el cantábrico los temporales proceden del noroeste, las playas de Navia y Salinas son las que mayores retrocesos acumulan anualmente. La playa de San Lorenzo, al abrigo del Cabo Peñas, acumula retrocesos algo menores. Cabe destacar que 2014 ha sido el año del periodo de estudio (1947-2014) en el que mayores erosiones se han acumulado en Navia, Salinas y Luarca.
- Tras el análisis del retroceso medio observado hasta el día de hoy, las playas situadas al oeste de Cabo Peñas son las que sufren las mayores erosiones llegando a superar los 4 metros de retroceso de línea de costa.
- Sólo teniendo en cuenta la variable nivel medio del mar, vinculada a los efectos del cambio climático en el litoral, se puede observar que en el año horizonte 2050 y con un aumento de 0.25 m la mayoría de playas de Asturias perderán entre 4 y 6 metros de playa seca, muchas de ellas situadas al oeste de Cabo Peñas. A fin de siglo, el patrón es similar pero llegando a alcanzar los 11, 15 y 25 metros de retroceso de línea de costa para aumentos del nivel medio del mar de 0.45, 0.65 y 1 metros, respectivamente. Esto se traduce en que, para 1 m de aumento del nivel medio del mar, la playa de Cervigón desaparecerá y Luarca, El Moro y la Ribera perderán el 99%, 81%, 67% y 62% de su anchura media actual. Mexota y Cadavedo verán reducido su ancho medio de playa seca a aproximadamente la mitad.
- Con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m el Playón de Bayas perderá hasta 15000 m³ de arena, seguida de la playa de Salinas con más de 9000 m³ de déficit sedimentario. Con 0.45 m de incremento del nivel otras playas como Vega, Xagó, San Lorenzo y Vidiago perderán más de 11000 m³ de arena. Rodiles y San Antolín requerirán un volumen de sedimento considerable a partir de 0.65 m de subida del nivel medio del mar y, considerando un aumento del nivel medio del mar de 1 m, el Playón de Bayas y la playa de Salinas necesitarán hasta 63000 m³ y 40000 m³ de arena, respectivamente.
- A mitad de siglo, el Playón de Bayas y Salinas perderán 13400 y 10600 m² de arena. Las playas de Xagó y San Lorenzo verán reducida su superficie en más de 7000 m². A final de siglo, con 1 m de aumento del NMM, las playas más afectadas serán el Playón de Bayas con una pérdida de 63000 m², Salinas con 40000 m², Xagó con 32000 m², San Lorenzo con 29500 m² y Vega con más de 27000 m².
- Para evaluar el retroceso de la línea de costa a medio y largo plazo (años horizonte 2050 y 2100, respectivamente) no es suficiente con tener en cuenta el aumento del nivel medio del mar sino que otras variables, como son la marea meteorológica, la marea astronómica y el oleaje, deben ser tenidas en cuenta. Sin embargo, en la

práctica, no está claro cómo resolver la interacción y acoplamiento entre las distintas escalas. En este estudio se han propuesto tres aproximaciones diferentes para agregar los efectos del corto plazo al aumento del nivel medio del mar. Tras analizar sus resultados se puede concluir que, cada una con sus particularidades, proporcionan resultados similares, lo que demuestra la consistencia del modelo utilizado.

- Para el escenario de aumento del nivel del mar de 0.24 m, las playas de San Juan y de Torimbia superarán los 5 m de retroceso medio de la línea de costa. Ligeramente por debajo, las playas de El Moro, Navia, La Grande, Salinas, Carriciega, Tenrero, Xagó y Vega erosionarán su línea de costa en torno a 4.5 m respecto a su posición actual. El escenario del aumento de nivel de 0.45 m arroja resultados muy similares aunque ninguna playa supera los 5 m de pérdida de playa seca. Por otra parte, las playas menos afectadas son las El Viso, La Griega, San Pedro de Antomero y La Palmera con retrocesos menores a 2 m. Los escenarios de aumento del nivel medio del mar de 0.65 y 1 m conllevan erosiones de mayor magnitud. Para el primero de ellos, el Playón de Bayas y las playas de San Juan, Xagó y Torimbia alcanzarán los 5 m de retroceso de línea de costa y, con un incremento de nivel de 1 m, San Juan y Torimbia superarán los 6 metros de pérdida de playa seca.

Finalmente, para cada escenario de aumento del nivel medio del mar propuesto se ha obtenido el retroceso de 5, 10, 25 y 50 años de periodo de retorno y el indicador de erosión asociado, que relacionan el retroceso esperado con el ancho de playa medio.

- Asumiendo un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a mitad de siglo, algunas playas como el Playón de Bayas, San Juan, Carriciega, Xagó, Vega y Torimbia superarán los 15 m de retroceso de línea de costa con un retorno de 5 años. Observando el retroceso asociado a 10 años de periodo de retorno, las playas mencionadas superarán los 17 m de pérdida de playa seca y a la lista se sumarán las de El Moro y Salinas. La playa de San Juan alcanzará los 21 m de erosión con un periodo de retorno de 25 años y los 23 m cada 50 años. Además, para el periodo de retorno de 50 años, otras playas como Salinas, El Viso, Xagó y Torimbia sufrirán retrocesos de hasta 22 m. Las playas con valores del indicador de erosión más elevados para los distintos periodos de retorno son las de Luarca, El Moro y Cervigón que, para 5 años de periodo de retorno alcanzan valores de 0.39, 0.42 y 0.63 m, superando ésta última el valor de 0.8 con 25 años de periodo de retorno, un umbral crítico que indica que la situación es altamente preocupante y que se debe actuar si no se quiere perder la playa seca.
- Las conclusiones que pueden extraerse para un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 son similares a las expuestas para el escenario de incremento del nivel del mar de 0.24 m a 2050: los retrocesos obtenidos son ligeramente inferiores pero los valores que asumen los indicadores de erosión se mantienen en el mismo rango.
- Para un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a final de siglo, los retrocesos obtenidos para los distintos periodos de retorno tienen valores más elevados pero siguen un patrón similar al resto de escenarios analizados, superando la erosión de 50 años de periodo de retorno los 24 m en la playa de San Juan. Las playas de Salinas, Xagó y Torimbia perderán hasta 23 m de playa seca. En cuanto a los

indicadores de erosión, para los periodos de retorno de 5 y 10 años, los cambios respecto a los de los escenarios de 0.24 y 0.45 m de aumento del nivel medio del mar, a 2050 y a 2100 respectivamente, son poco apreciables. Sin embargo, para los periodos de retorno más elevados el valor de estos indicadores aumentará llegando la playa de El Moro a 0.65, Luarca a 0.7 y Cervigón a 0.97. Para ese mismo periodo de retorno, las playas de La Ribera y Cadavedo superarán el valor de 0.4.

- La erosión de 50 años de periodo de retorno para un aumento del nivel medio del mar de 1 m causará un retroceso mayor a 22 metros en 22 de las 57 playas de estudio, entre las que se encuentra San Lorenzo. El Moro, La Grande, Salinas y Xagó, perderán en ese caso más de 26 m de playa seca y las playas de San Juan y Torimbia retrocederán su línea de costa en torno a los 27 m. Con respecto a los indicadores de erosión, las playas de Cadavedo y Mexota superarán el valor de 0.5 y La Ribera alcanzará el 0.6, para el retroceso de 50 años de periodo de retorno. Sin embargo, las playas más preocupantes son las de El Moro, Luarca y Cervigón que llegarán a valores del indicador de 0.75, 0.84 y 1.14, respectivamente, por lo que las dos primeras estarán en peligro de perder la playa y la última la habría perdido por completo.

6.3. Cambios morfodinámicos en estuarios

En la Tarea 2.4 se han analizado los efectos del cambio climático sobre los elementos morfológicos de los principales estuarios asturianos, Eo, Navia, Nalón, Avilés, Villaviciosa y Ribadesella, con base en formulaciones empíricas de equilibrio.

La metodología propuesta ha incluido la adaptación a la zona de estudio de los coeficientes de proporcionalidad que intervienen en dichas formulaciones. Con este objetivo se ha planteado obtener el valor óptimo de los citados coeficientes según una curva de ajuste entre los elementos morfológicos de los estuarios y su prisma de marea. En el análisis realizado se han incluido los estuarios asturianos objeto del presente estudio y los estuarios cántabros estudiados por IHCantabria en el marco de otros proyectos: Tina Mayor, Tina Menor, San Vicente, Oyambre, San Martín de la Arena, Pas, Ajo, Santoña y Oriñón.

Una vez conocidos coeficientes de proporcionalidad ($C=1,94$ y $E=1,56$), se ha evaluado el efecto del aumento del nivel del mar ($\Delta\eta$) en los bajos interiores, desembocadura, bajo exterior y canales mareales, aplicando las ecuaciones 5.6, 5.9, 5.11 y 5.13, respectivamente.

Debido a la incertidumbre asociada por un lado, a la falta de detalle en los datos batimétricos utilizados y, por otro, a la falta de batimetrías históricas y de datos de actuaciones antrópicas que permitan validar los resultados de los modelos de equilibrio, los valores aquí presentados deben tomarse como una estimación de tendencias y no como valores absolutos. Una vez tenido esto en cuenta, a partir del análisis de resultados puede extraerse las conclusiones siguientes.

Si la tasa de generación de sedimentos es suficiente para que la cota de los bajos interiores aumente conforme aumenta el nivel medio ($\alpha = \Delta\eta$), no se producirá un incremento de prisma de marea ($\Delta\Omega = 0$) y, en consecuencia, los elementos morfológicos

de los estuarios permanecerán inalterados. En caso contrario, ($\alpha < \Delta\eta$), se producirá un incremento del prisma de marea ($\Delta\Omega > 0$) y, por lo tanto, un desequilibrio que alterará los diferentes elementos morfológicos del estuario de la siguiente forma:

En los bajos interiores se generará un déficit sedimentario. En consecuencia, tenderán a demandar sedimento para aumentar su cota (α) y reducir así el incremento de prisma generado. Este proceso continuará hasta que se alcance un nuevo equilibrio dinámico ($\Delta\Omega = 0$) afectando en un mayor porcentaje a los bajos interiores de Eo seguidos por los de Ribadesella, Villaviciosa, Avilés, Nalón y Navia (véanse las figuras 5.18 y 5.19).

El sedimento demandado por los bajos interiores procederá fundamentalmente del río, siempre y cuando este no se encuentre regulado por presas o embalses, y de la redistribución de sedimento en el interior del estuario. Por lo tanto, se reducirá el aporte de sedimentos del río a la playa.

En la desembocadura se irá produciendo un incremento gradual en el área de la sección crítica hasta que se alcance un nuevo estado de equilibrio ($\Delta\Omega = 0$). Las áreas de las desembocaduras de los estuarios Villaviciosa, Navia y Ribadesella serán las que experimenten un mayor porcentaje de cambio, seguidas por Nalón, Eo y, en último lugar, Avilés (véase la figura 5.20).

En el bajo exterior se generará un déficit de volumen que tenderá a compensarse para restablecer la condición de equilibrio dinámico ($\Delta\Omega = 0$). En este caso, el mayor porcentaje de cambio se producirá en los bajos exteriores de los estuarios de Villaviciosa, Navia y Ribadesella, seguidas por los de Nalón, Eo y Avilés (véase la figura 5.21).

En el caso de los bajos exteriores el déficit sedimentario será cubierto, fundamentalmente, con la arena disponible de la playa adyacente produciendo la erosión de la misma.

En los canales mareales el volumen tenderá a aumentar hasta alcanzar un nuevo estado de equilibrio dinámico ($\Delta\Omega = 0$). Los canales de Villaviciosa, Navia y Ribadesella serán los que experimenten un mayor porcentaje de cambio, seguidos por los de Nalón, Eo y, en última posición, Avilés (véase la figura 5.22).

Ya que la dinámica en la zona exterior de los estuarios es mucho más activa que la zona interior, cabe esperar que el restablecimiento del equilibrio dinámico en la desembocadura y en el bajo exterior se produzca en menores periodos de tiempo (temporales/semanas/años) que en los bajos interiores y en los canales mareales (décadas).

7. REFERENCIAS

- Agudo (2013). Estudio de la evolución morfológica de los canales mareales de la ría de la raba tras la obras de recuperación y restauración ambiental. Tesis doctoral, Universidad de Cantabria.
- Área de información y gestión cartográfica del Principado de Asturias. Visor cartográfico: <http://sitpa.cartografia.asturias.es> (último acceso: marzo de 2015).
- Autoridad Portuaria de Gijón y Avilés. Batimetría del Puerto de Avilés (año 1995).
- Bates, P.D., Horritt, M.S., Fewtrell, T.J., 2010. A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *Journal of Hydrology* 387(1–2): 33–45.
- Birkemeier, W. A., 1985. Field data on seaward limit of profile change. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 111(3), 598-602.
- Brown, J.M, Davies, A.G., 2009. Methods for medium-term prediction of the net sediment transport by waves and currents in complex coastal regions. *Continental Shelf Research* 29, 1502–1514.
- Bruun, P., 1954. Coast erosion and the development of beach profiles. Technical Memorandum, vol. 44. Beach Erosion Board, Corps of Engineers, 82 pp.
- Bruun, P., 1962. Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of the Waterways and Harbors Division* 88, 117 – 130.
- Bruun, P., 1983. Review of conditions for use of the Bruun Rule of erosion. *Coastal Engineering* 7, 77 – 89.
- Camus P., F.J. Méndez, R. Medina, A. Tomas and C. Izaguirre, 2013. High resolution Downscaled Ocean Waves (DOW) reanalysis in coastal areas. *Coastal Engineering*, 72, 56-68.
- Cayocca, F., 2001. Long-term morphological modeling of a tidal inlet: the Arcachon Basin, France. *Coastal Engineering* 42, 115–142.
- CEDEX: <http://hercules.cedex.es> (último acceso: marzo de 2015).
- Church, J.A., White, R., Coleman, R., Lambeck, K. and Mitrovica, J.X., 2004. Estimates of the Regional Distribution of Sea Level Rise over the 1950 to 2000 Period. *Journal of Climate*, 17, 2609-2625.
- Cid, A., S. Castanedo, A.J. Abascal, M. Menéndez and, R. Medina, 2014. A high resolution hindcast of the meteorological sea level component for Southern Europe: the GOS dataset. *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-013-2041-0.
- Davidson, M. A., and I. L. Turner, 2009. A behavioral template beach profile model for predicting seasonal to interannual shoreline evolution, *J. Geophys. Res.*, 114, F01020, doi: 10.1029/2007JF000888.
- Davidson, M. A., R. P. Lewis, and I. L. Turner, 2010. Forecasting seasonal to multi-year shoreline change, *Coastal Eng.*, 57, 620–629, doi: 10.1016/j.coastaleng.2010.02.001.

- Davidson, M. A., K. D. Splinter, and I. L. Turner, 2013. A simple equilibrium model for predicting shoreline change, *Coastal Engineering*, 73, 191–202, doi: 10.1016/j.coastaleng.2012.11.002.
- Dean, R.G., 1991. Equilibrium beach profiles: principles and applications. *Journal of Coastal Research* 7 (1), 53– 84.
- De Vriend, 1996. Mathematical modelling of meso–tidal barrier island coasts. Part I. Empirical and semi-empirical models. P.L.-F. Liu (Ed.), *Advances in Coastal and Ocean Engineering*, World Scientific, Singapore.
- De Vriend, H.J., Capobianco, M., Chesher, T., De Swart, H.E., Latteux, B, Stive, M.J.F., 1993. Approaches to long-term modelling of coastal morphology: A review. *J. Coastal Eng.*, 21, pp. 225–269.
- De Vriend, H.J., Louters, T., Berben, F, Steijn, R.C., 1989. Hybrid prediction of a sandy shoal in a mesotidal estuary. R.A. Falconer (Ed.), et al., *Hydraulic and Environmental Modelling of Coastal, Estuarine and River Waters*, Gower Technical, Aldershot, pp. 145–156.
- Dissanayake, D. M. P. K., Roelvink, J. A, van der Wegen, M., 2009, Modelled channel patterns in a schematized tidal inlet, *Coastal Engineering*, 56(11–12), 1069–1083.
- Di Silvio, G., 1989. Modelling the morphological evolution of tidal lagoons and their equilibrium configuration. In: *Proc. XXIIIrd Congress, Ottawa*, pp. C. 169-175.
- EurOtop — Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual, 2007. Environment Agency (UK), Expertise Netwerk Waterkeren (NL), Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (DE), Pullen, T., Allsop, N.W.H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schüttrumpf, H. and van der Meer, J.W.
- Flor, G., Fernández-Pérez, L.A., Cabrera-Ceñal, R., 1993. Aspectos morfológicos del estuario del Eo. *Trabajos de Geología. Univ. De Oviedo*, 19, 75-95.
- Flor, G., Fernández-Pérez, L.A., Cabrera-Ceñal, R., 1992. Características dinámicas y sus relaciones sedimentarias en la ría del Eo (Galicia-Asturias, Noroeste de España). *Rev. Soc. Geol. España*, 5, (1-2).
- Flor, G., Cambor, C., 1989. Características dinámicas y sedimentológicas del estuario de Ribadesella (Asturias N de España). *Trabajos de Geología. Universidad de Oviedo*, Vol. 18, 13-36. ISSN 0474-9588.
- Franco, L., Cavani, A., 1999. Overtopping response of core-locs, tetrapods and antifer cubes. *Proc. Coastal Structures '99*, A.A. Balkema, Rotterdam (1999), pp. 383–387 ISBN 90 5809 092 2.
- Franco, L., de Gerloni, M., van der Meer, J.W., 1994. Wave overtopping on vertical and composite breakwaters. In: *Proc. 24th International Conference on Coastal Engineering*. ASCE, ASCE, New York, pp. 1030–1044, ISBN 0-7844-0089-X.
- Gobierno del Principado de Asturias: www.asturias.es (último acceso: marzo de 2015).
- Gouldby, B., Sayers, P., Mulet-Martí, J., Hassan, M. and Benwell, D., 2008. A methodology for regional-scale flood risk assessment. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Water Management* 161(3): 169–182.

- Guía de playas de España, 2015. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Enlace: <http://www.magrama.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/costas-medio-marino/guia-playas-descargas.aspx>
- Hinkel, J., Nicholls, R.J., Tol, R.S.J., Wang, Z.B., Hamilton, J.M., Boot, G., Vafeidis, A.T., McFadden, L., Ganopolski, A., Klein, R.T.J., 2013. A global analysis of erosion of sandy beaches and sea-level rise: An application of DIVA. *Global and Planetary Change* 111, 150-158.
- HR Wallingford, 2006. Rapid Flood Spreading Methodology (RFSM). Thames Estuary 2100 Report DT4. Environment Agency, Bristol, UK.
- Hume, T.M., Herdendorf, C.E., 1993. On the use of empirical relationships for characterizing estuaries. *Journal of Coastal Research*, 9(2), 413-422. Fort Lauderdale (Florida), ISSN 0749-0208.
- Instituto Geográfico Nacional: www.ign.es (última consulta: mayo de 2015).
- Instituto Hidrográfico de la Marina. Cartas náuticas cartas náuticas: 932, 933, 934, 935, 9350, 936 y 937.
- IPCC, 2014. 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. Chapter 5.
- Jamieson, S., Lhomme, J., Wright, G. and Gouldby, B., 2012. Highly efficient 2D inundation modelling with enhanced diffusion-wave and sub-element topography. *Proc. Inst. Wat. Man.* 165 (10): 581-595.
- Jara, M.S., González, M., Medina, R., 2015. Shoreline evolution model from a dynamic equilibrium beach profile. *Coastal Engineering*, Volume 99, May 2015, Pages 1-14, ISSN 0378-3839.
- Kragtwijk, N., Zitman, T.J., Stive M.J.F, Wang, Z.B., 2004. Morphological response of tidal basins to human interventions. *Coastal Engineering*, (51): 207-221.
- Kriebel, D. L. y Dean, R. G., 1993. "Convolution method for time-dependent beach profile response" . *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 119 (2), pp. 204-227.
- Larson, M., Capobianco, M., Jansen, H., Rózyński, G., Southgate, H.N., Stive, M., Wijnberg and K.M, Hulscher, S., 2003. Analysis of field data of coastal morphological evolution over yearly and decadal timescales. Part 1: Background and linear techniques. *Journal of Coastal Research*, 19 (4), 760–775. 26.
- Lesser, G., 2009. An approach to medium-term coastal morphological modeling, PhD-thesis. Delft University of Technology, ISBN 978-0-415-55668-2.
- Lesser, G., Roelvink, J., van Kester, J, Stelling, G., 2004. Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coast. Eng.* 51, 883–915.
- Marciano, R., Wang, Z.B., Hibma, A., de Vriend, H.J, Defina, A., 2005. Modeling of channel patterns in short tidal basins. *J. Geophys. Res.* 110, F01001.

- Marquinez, J., Fernández, E., Fernández, S., 2003. Indicadores morfológicos del alcance de la onda mareal en estuarios: terrenos reclamados durante el pasado siglo en el estuario de Ribadesella (Costa Cantábrica). *Naturalia Cantabrica* 2: 1-10.
- Miller, J. K., and R. G. Dean, 2004. A simple new shoreline change model, *Coastal Eng.*, 51, 531–556.
- O'Brien, M.P., 1969. Equilibrium flow areas of inlets on sandy coasts. *Journal of the Waterways, Harbours Division, ASCE*, 95 (WW1), 43–51. 27.
- O'Brien, M.P., 1931. Estuary tidal prisms related to entrance areas. *Civil Engineering*, 1, 738–739. 27.
- Renger, E., 1976. Quantitative Analyse der Morphologie von Wattenzugsgebieten und Tidebecken, *Mitteilungen des Franzius-Instituts*, Hef 43.
- Renger, E, y Partensky, W., 1974. Stability criteria for tidal basins, *Proc. 14th, Coastal Eng. Conf. ASCE*. 1605-1618.
- Roelvink, J.A., 2006. Coastal morphodynamic evolution techniques. *Coastal Engineering* 53, 277–287.
- Rosati, J. D.; Dean, R. G., and Walton, T. L., 2013. The modified Bruun Rule extended for landward transport. *Marine Geology*, 340, 71–81.
- ROM 0.0, 2001. General Procedure & Requirements for the Design of Harbor and other Maritime Structures (Part I). Ministerio de Fomento. Gobierno de España.
- Servicio de Puertos e Infraestructuras del Transporte del Gobierno del Principado de Asturias. Batimetrías: Eo (año 2005), Navia (año 2010), Nalón (año 2005), Villaviciosa (año 2010) y Ribadesella (año 2011).
- Shore Protection Manual, 1984. Department of the Army. US. Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Research Center. Washington D.C., 20314.
- Southgate, H.N., Wijnberg, K.M., Larson, M., Capobianco, M., Jansen, H., 2003. Analysis of field data on coastal morphological evolution over yearly and decadal time scales. Part II, Non-Linear Techniques. *Journal of Coastal Research*, Vol. 19, No. 4.
- Stive, M. J., & Wang, Z. B., 2003. Morphodynamic modeling of tidal basins and coastal inlets. *Elsevier oceanography series*, 67, 367-392.
- Stive, M.J.F., Capobianco, M., Wang, Z.B.; Ruol, P., Buijsman, M.C., 1998. Morphodynamics of a Tidal Lagoon and the Adjacent Coast, in Dronkers, J. and Scheffers, M.B.A.M. (ed.), *Physics of estuaries and coastal seas*, Balkema, Rotterdam, 1998, pp 397-407.
- Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A. and Sallenger, A.H., Jr., 2006. Empirical Parameterization of Setup, Swash, and Runup. *Coastal Engineering* 53 573-588, Elsevier Publishing, the Netherlands.
- Tönis, I. E., Stam, J. M. T., & Van de Graaf, J., 2002. Morphological changes of the Haringvliet estuary after closure in 1970. *Coastal Engineering*, 44(3), 191-203.

- Tung, T.T. 2011. Morphodynamics of seasonally closed coastal inlets at the central coast of Vietnam. Doctoral thesis, Delft University of technology. 29, 30.
- Tung, T.T., Wastra, D.J.R., DE Graff, J.V. and Stive, M.J.F., 2009. Morphological modelling of tidal inlet migration and closure. *Journal of Coastal Research*, 1080–1084. 29, 30, 80.
- Van der Wegen, M., 2013. Numerical modeling of the impact of sea level rise on tidal basin morphodynamics. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(2), 447-460.
- Van der Wegen, M., Roelvink, J.A., 2008. Long-term morphodynamic evolution of a tidal embayment using a two-dimensional, process-based model. *Journal of Geophysical Research* 113, C03016.
- Van der Wegen, M., Wang, Z. B., Savenije, H. H. G. and Roelvink, J. A., 2008, Long-term morphodynamic evolution and energy dissipation in a coastal plain, tidal embayment, *J. Geophys. Res.*, 113, F03001, doi: 10.1029/2007JF000898.
- Van Dongeren, A.D. and de Vriend, H.J., 1994. A model of morphological behaviour of tidal basins. *Coastal Engineering*, 22, 287–310. 28.
- Van Dongeren, A., 1992. A model of the morphological behaviour and stability of channels and flats in tidal basins. M. Sc. Thesis, Report H824.55. Delft University of Technology/DELFTHYDRAULICS, Delft, March 1992.
- Walstra, D.J.R., Hoekstra, R., Tonnon, P.K, Ruessink, B.G., 2013. Input reduction for long-term morphodynamic simulations in wave-dominated coastal settings. *Coastal Engineering* 77 (2013) 57–70
- Walton, T.L., and Adams, W.D., 1976. Capacity of inlet outer's bars to store sand, Chapter 112, *Proceedings, Fifteenth International Conference on Coastal Engineering*, American Society of Civil Engineers, Honolulu, HI, p 1919-1937.
- Wang, Z.B., Langerak, A, Fokkink, R.J., 1999. Simulation of long-term morphological development in the Western Scheldt, IAHR symposium on River, Coastal and estuarine morphodynamics, Genova, Italy, 1999.
- Wang, Z.B., Karssen, B., Fokkink, R.J, Langerak, A., 1998. A dynamic/empirical model for long-term morphological development of estuaries, in Dronkers, J. and Scheffers, M.B.A.M. (ed.), *Physics of estuaries and coastal seas*, Balkema, Rotterdam, 1998, pp 279-286.
- Wang, Z.B., Louters, T, de Vriend, H.J., 1995. Morphodynamic modeling for a tidal inlet in the Wadden Sea. *Marine Geology*, 126, 289–300. 29, 30.
- Yates, M. L., R. T. Guza, and W. C. O'Reilly, 2009. Equilibrium shoreline response: Observations and modeling, *J. Geophys. Res.*, 114, C09014, doi: 10.1029/2009JC005359.
- Yates, M. L., R. T. Guza, W. C. O'Reilly, J. E. Hansen, and P. L. Barnard, 2011. Equilibrium shoreline response of a high wave energy beach, *J. Geophys. Res.*, 116, C04014, doi: 10.1029/2010JC006681.



TAREA 2.5:

VULNERABILIDAD Y RIESGOS DERIVADOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL LITORAL ASTURIANO



1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas costeros son particularmente vulnerables al aumento del nivel medio del mar y a los cambios en la intensidad y frecuencia de las inundaciones. Además del riesgo de inundación permanente en zonas bajas debido al aumento del nivel medio del mar, otros impactos de cambio climático incluyen un aumento de la erosión en playas y acantilados, la degradación de ecosistemas costeros y la intrusión salina (EEA, 2010a; ETC/ACC, 2010a; ETC/ACC, 2010b). 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 evaluación de riesgos permiten identificar las áreas más expuestas a diferentes impactos, entender el origen de los mismos, identificar su extensión y severidad, y asistir en la elaboración de planes de gestión y toma de decisiones tales como estrategias de adaptación.

El objetivo de este estudio es el de dar una estimación de la dimensión del cambio climático en el Principado de Asturias mediante la determinación del riesgo sobre sus sistemas socioeconómico y natural. En el primer caso, se pretenden estimar las consecuencias esperables debidas a los impactos de inundación y erosión para distintos escenarios propuestos. Por otro lado, y en lo que respecta al sistema natural, se ha analizado la respuesta de los hábitats y especies costeras a los riesgos derivados de los cambios en el nivel medio y la temperatura superficial del mar.

La estructura del presente documento es la siguiente:

- Metodología: en este capítulo se describe el desarrollo metodológico propuesto, basado en la definición del riesgo como la combinación de la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad.
- Riesgo sobre el sistema socioeconómico: este capítulo muestra las consecuencias socioeconómicas derivadas del impacto de inundación para una serie de escenarios de riesgo propuestos, que combinan eventos extremos y aumento del nivel medio del mar. Por otro lado, se ha propuesto una aproximación para evaluar las consecuencias que conlleva la erosión de playas sobre el turismo en términos de pérdida de valor de uso recreativo.
- Riesgo sobre el sistema natural: en este capítulo se ha evaluado el riesgo derivado de los impactos del cambio climático sobre las especies y ecosistemas costeros en la costa de Asturias, en concreto aquellos derivados del aumento de la temperatura superficial del mar y del potencial incremento del nivel de mar, con los consecuentes procesos de inundación.

2. METODOLOGÍA

En este estudio se propone una metodología para analizar, en el litoral asturiano y bajo distintos escenarios, el riesgo de inundación y erosión sobre el sistema socioeconómico y los riesgos de inundación por aumento de nivel y de incremento de la temperatura superficial del mar en el sistema natural.

El análisis del riesgo que se plantea está enmarcado dentro de una metodología más general de riesgo adoptada por el IPCC (IPCC, 2014). En este marco más general, el concepto de riesgo se basa en la combinación de la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad, configurando lo que se conoce como el triángulo del riesgo (Schneiderbauer y Ehrlich, 2004), aplicado principalmente en la investigación de desastres naturales.

El IPCC define el riesgo como la probabilidad de que, durante un período de tiempo, se produzcan alteraciones graves del funcionamiento normal de una comunidad o una sociedad debido a los fenómenos físicos peligrosos que interactúan con condiciones sociales vulnerables, dando lugar a efectos humanos, materiales, económicos o ambientales adversos generalizados que requieren una respuesta inmediata a la emergencia para satisfacer las necesidades humanas esenciales, y que pueden requerir apoyo externo para la recuperación.

El nivel de peligrosidad de una inundación se puede expresar en términos de intensidad, asociados a la cota de inundación, o de probabilidad, asociados a periodos de retorno. En este estudio se ha determinado la distribución estadística de la amenaza y se han seleccionado cuantiles asociados a distintos periodos de retorno.

La exposición y la vulnerabilidad, principales factores determinantes del riesgo, son dinámicas, varían en el tiempo y el espacio y dependen de factores económicos, sociales, geográficos, demográficos, culturales, institucionales y ambientales. La primera comprende la presencia de personas, servicios, recursos ambientales, infraestructura y bienes económicos, sociales o culturales en lugares que podrían verse afectados negativamente como consecuencia de un evento. Viene representada por los activos existentes en cada localización, por lo que se ha empleado un Modelo Digital de Terreno (MDT) de 5 m de resolución horizontal en el que se han incluido las defensas costeras, digitalizadas a partir de planos, con el fin de mejorar la definición de las infraestructuras portuarias. Por otro lado, la vulnerabilidad hace referencia al contexto físico, social, económico y ambiental de una región, sector o grupo social susceptible de ser afectado por un fenómeno meteorológico o climático. Ésta se puede obtener en función del valor económico asignado a cada tipo de uso del suelo, utilizando lo que comúnmente se llaman funciones de daños. La figura 1 muestra un esquema conceptual del desarrollo metodológico que se propone, donde el riesgo (R), entendido como la probabilidad de un evento y sus consecuencias negativas, se expresa como el producto de la peligrosidad (P), definida a través de las dinámicas marinas, la exposición (E), asociada al medio físico, la población y los activos sujetos a inundaciones, y la vulnerabilidad (V), relacionada con la capacidad de la sociedad para afrontar un evento de inundación ($R=PEV$). De este modo, si alguno de estos factores aumenta, también lo hará el riesgo.



Figura 2.1. Triángulo del riesgo.

3. RIESGO SOBRE EL SISTEMA SOCIOECONÓMICO

3.1. Caracterización de la vulnerabilidad

Para caracterizar la vulnerabilidad de un sistema es importante determinar la sensibilidad y la capacidad de adaptación o resiliencia de los distintos elementos identificados en la zona expuesta. La sensibilidad hace referencia al grado de afección que puede generar la peligrosidad sobre el sistema y la resiliencia es la capacidad de un sistema para absorber el impacto y reorganizarse para conservar su función, estructura e identidad (Walker et al., 2004). Para ello, en el caso del riesgo de anegación, es necesario discernir las dos tipologías de inundación ya que la cuantificación del daño debe llevarse a cabo de forma distinta para cada uno de ellas. Los posibles daños producidos por una inundación debida a un evento extremo dependen de la cota de inundación alcanzada en cada zona y se determinan mediante la aplicación de curvas de daño; en el caso de inundación permanente, sin embargo, la pérdida es total, independientemente del nivel de agua que se alcance.

En este estudio, la vulnerabilidad se ha centrado en el factor social, a través de la población, el factor físico, mediante usos del suelo y las características tipológicas de cada playa, el factor económico, a través de indicadores económicos tales como el stock de capital y el Valor Añadido Bruto (VAB) y el factor medioambiental, con la valoración de los servicios ecosistémicos.

3.1.1. Población

La distribución espacial de la población se ha realizado a través de un ráster de población europea de resolución horizontal 100 x 100 m producido por el Joint Research Centre (JRC) en 2011 (Batista e Silva et al., 2013). Las figuras 3.1 y 3.2 muestran la distribución de la población en el litoral asturiano y en las zonas de Navia, Luarca, Cabo Peñas, Ribadesella y Llanes, respectivamente.

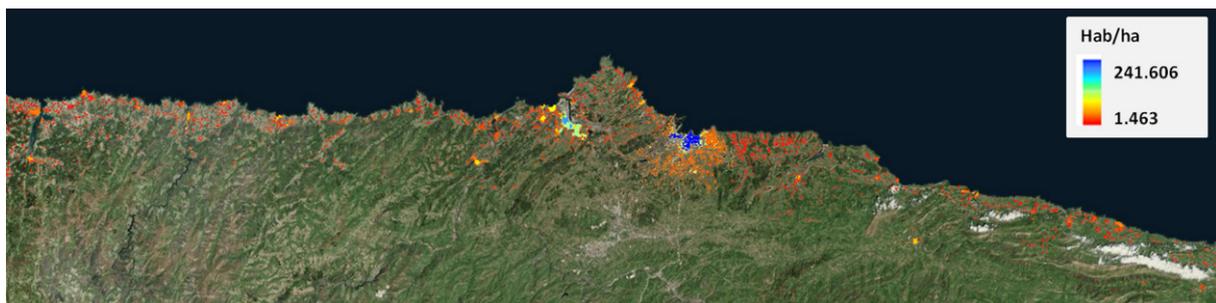


Figura 3.1. Ráster de población europea de resolución 100 x 100 m en el litoral asturiano



Figura 3.2. Ampliación de ráster de población en las zonas de Navia (panel izquierdo), Luarca (panel en centro-izquierda), Cabo Peñas (panel central), Ribadesella (panel en centro-derecha) y Llanes (panel derecho).

3.1.2. Usos del suelo

En este estudio, se ha considerado la cuantificación del daño relativo a los usos del suelo urbano, industrial, agrícola y del sector servicios. Por ello, y como parte de la caracterización de la vulnerabilidad, se ha empleado la base de datos del Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España (SIOSE) a escala 1:25000, integrado dentro del Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT). La principal característica de la base de datos SIOSE es que sigue un modelo de datos orientado a objetos por lo que no clasifica el terreno sino que lo describe mediante coberturas o combinaciones de ellas con sus diferentes porcentajes de ocupación y atributos.

La figura 3.3 muestra la capa vectorial de usos del suelo de SIOSE para cada concejo del litoral del Principado de Asturias.



Figura 3.3. Caracterización de los usos del suelo a través de la base de datos SIOSE para cada concejo del litoral asturiano.

A continuación se muestra la ampliación de la capa en algunos concejos (véase la figura 3.4).



Figura 3.4. Ampliación de la capa de SIOSE en los concejos de Castropol, Tapia de Casariego, El Franco, Coaña, Navia y parte de Valdés (panel izquierdo), parte de Cudillero, Muros de Nalón, Pravia, Soto del Barco, Castrillón, Avilés, Gozón, Carreño y parte de Gijón (panel central) y parte de Colunga, Caravia, Ribadesella y parte de Llanes (panel derecho).

La mayor limitación del SIOSE es la agregación de distintas categorías de terreno en cada uno de los polígonos que conforman la base de datos. De este modo no es posible conocer la distribución espacial celda a celda de los usos del suelo. Con el fin de solventar esta restricción, se ha empleado, en el caso de viviendas e instalaciones industriales, la Base Cartográfica Numérica (BCN25) complementada con la Base Topográfica Nacional (BTN25). Estas bases de datos, ambas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y con cobertura nacional a escala 1:25000, proporcionan infraestructuras básicas de datos vectoriales cuyos datos han sido capturados directamente sobre el terreno o mediante técnicas indirectas de adquisición como la restitución fotogramétrica, digitalización sobre orto fotografías, etc.

A continuación, se muestra la distribución espacial de edificios de viviendas e instalaciones industriales de las bases de datos BCN25 y BTN5 en el litoral asturiano (véase la figura 3.5).

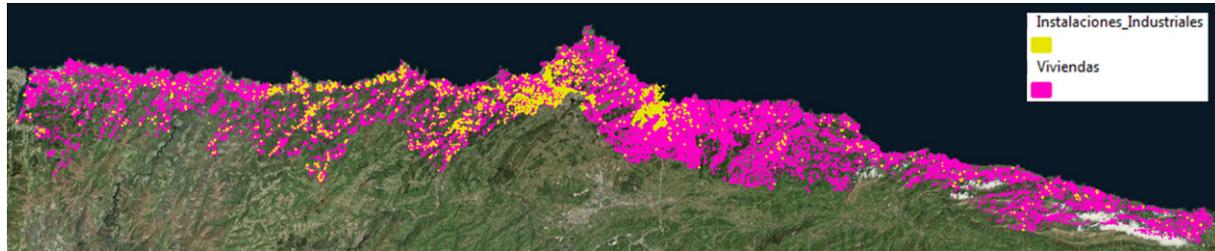


Figura 3.5. Distribución espacial de instalaciones y viviendas de la base de datos BCN25/BTN25 en el litoral del Principado de Asturias.

La figura 3.6 muestra una ampliación de las zonas de Luarca, San Juan de la Arena y Avilés y Gijón, donde se puede observar la buena definición de las distintas edificaciones.



Figura 3.6. Ampliación de las capas de viviendas e instalaciones industriales de BCN25/BTN25 en las zonas de Luarca (panel izquierdo), San Juan de la Arena - Avilés (panel central) y Luanco (panel derecho).

En el caso del uso del suelo agrícola no se ha encontrado una combinación de capas vectoriales de las bases BTN25/BTN25 que represente de manera adecuada, y en su totalidad, el conjunto de elementos que lo componen. Por tanto, para evaluar los posibles daños producidos por inundaciones en esta categoría se ha empleado la capa del SIOSE.

3.1.3. Características físicas de las playas de estudio

El Principado Asturias cuenta con más de trecientos cuarenta y cinco kilómetros de playa a lo largo de todo su litoral, lo que ha hecho que gran parte de su desarrollo socioeconómico haya estado siempre ligado al mar. Las playas son sistemas naturales sometidos en la actualidad a una gran presión urbanística y climática, además de responder al principal factor de producción turística del litoral asturiano. De entre sus funciones más relevantes destacan fundamentalmente tres: actuar como depositario de biodiversidad y productividad ecosistémica, ofrecer protección costera y satisfacer necesidades recreativas generando el bienestar de los usuarios.

La erosión costera está poniendo en riesgo uno de los principales recursos de la región, el turismo del llamado "sol y playa". No obstante, este problema es complicado y específico de cada playa. Entre otros factores, influyen las características físicas del sedimento, las condiciones locales del oleaje y la batimetría, la orientación y la configuración de la costa.

La evaluación de las consecuencias que la erosión costera debida al cambio climático conllevará sobre el sistema socioeconómico asturiano se ha llevado a cabo en 57 playas del Principado (véase la figura 3.7.) cuya longitud es igual o mayor a 200 metros y su sedimento arena.

SELECCIÓN DE PLAYAS ASTURIAS



Figura 3.7. Selección de playas de la costa del Principado de Asturias.

3.1.4. Indicadores socioeconómicos

El factor económico de la vulnerabilidad se ha caracterizado a través de indicadores tales como el stock de capital y el Valor Añadido Bruto (VAB).

El stock de capital comprende el conjunto de activos fijos durables utilizados directamente en la producción de bienes y servicios y resulta de los flujos de inversión pasados, de su composición por tipos de activo y del ritmo de depreciación de cada uno de estos.

La Fundación BBVA dispone de bases de datos sobre stock de capital de España que periódicamente son actualizadas. La figura 3.8 muestra el stock de capital neto de 2011 del Principado de Asturias por ramas de actividad y por tipo de activos, en miles de euros de 2006.

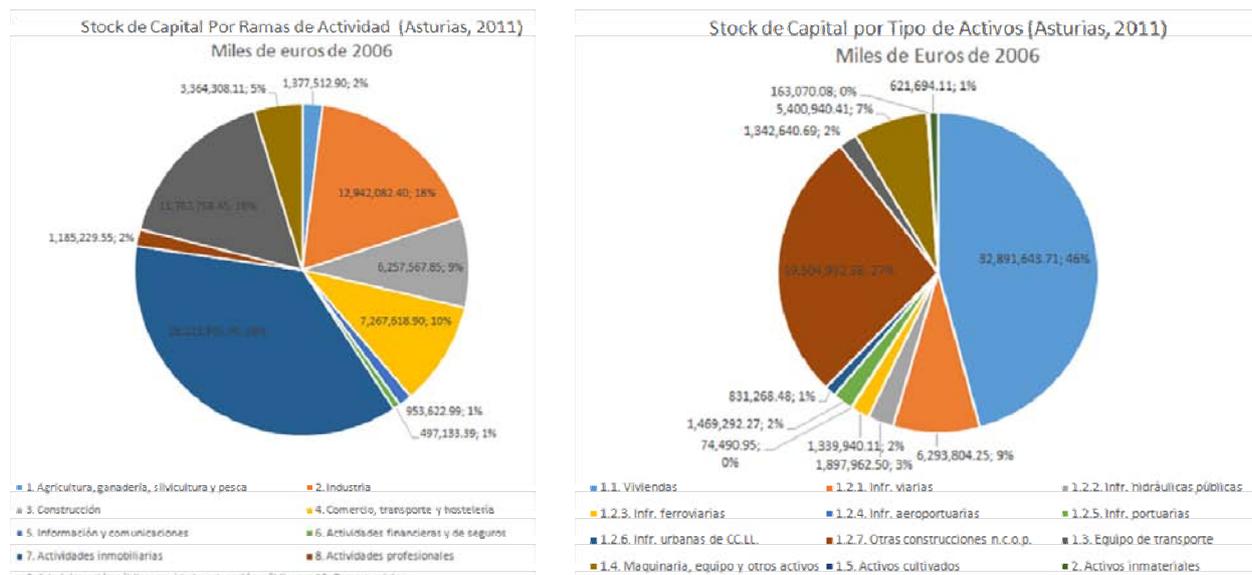


Figura 3.8. Stock de capital agregado a la provincia del Principado de Asturias por ramas de actividad y por tipo de activos (Fundación BBVA)

Otro indicador económico que contribuye a la caracterización económica de una región es el Valor Añadido Bruto (VAB), que responde a la riqueza generada durante un periodo considerado obtenida como la diferencia entre el valor de la producción y los consumos intermedios utilizados como materias primas, servicios y suministros exteriores, etc.

Por otro lado, y aunque en el presente estudio se ha utilizado únicamente como instrumento de reparto, la Renta Disponible Ajustada Neta (RDAN) es el resultado de sumar a la renta regional disponible las transferencias sociales en especie, que incluyen las prestaciones gratuitas de sanidad y educación, entre otras.

La Sociedad Asturiana de Estudios Económicos e Industriales (SADEI) elabora estadísticas sobre magnitudes económicas, renta y gasto de los hogares asturianos. La figura 3.8 muestra parte de las bases de datos de SADEI de la RDAN y el VAB a precios básicos en miles de euros y desagregados por concejo. El año de referencia es 2010.

	Saldo de rentas primarias neto	Renta disponible neta	Renta disponible ajustada neta
ASTURIAS	13,926	14,189	16,814
1 Allande	11,428	12,525	14,744
2 Aller	10,380	14,553	16,854
3 Amieva	9,932	12,174	14,377
4 Avilés	14,481	14,120	16,910
5 Belmonte de Miranda	12,342	14,582	16,329
6 Bimenes	10,485	14,334	16,622
7 Boal	11,734	13,253	15,295
8 Cabrales	11,745	12,930	15,273
9 Cebrienes	9,147	11,303	13,773
10 Candamo	11,110	12,871	15,174

	Valor añadido bruto a p.b.	Agricultura y pesca	Industria	Construcción	Servicios
ASTURIAS	19,918,251	320,270	4,573,668	1,609,748	13,414,565
1 Allande	21,475	6,990	725	2,271	11,489
2 Aller	120,062	3,199	32,390	12,471	72,002
3 Amieva	11,114	950	4,027	713	5,424
4 Avilés	1,507,048	9,522	465,307	110,331	921,888
5 Belmonte de Miranda	29,445	2,385	12,486	1,203	13,371
6 Bimenes	12,115	471	1,647	2,182	7,815
7 Boal	23,390	1,807	5,540	1,469	14,574
8 Cabrales	33,097	4,433	5,670	3,341	19,653
9 Cabranes	8,537	910	1,066	936	5,625
10 Candamo	16,124	2,045	289	3,876	9,914
11 Cangas del Narcea	212,877	11,366	47,547	28,195	125,789
12 Cangas de Onís	102,214	4,112	6,032	9,398	82,471
13 Caravia	7,643	258	399	757	6,229
14 Carreño	454,350	4,138	282,495	42,226	125,491
15 Caso	11,171	1,780	562	1,648	7,181

Figura 3.9. Renta Disponible Ajustada neta (panel izquierdo) y Valor Añadido Bruto a p.b. (panel derecho) del Principado de Asturias desagregados por concejos (SADEI).

3.1.5. Valoración económica de servicios ecosistémicos

Las funciones y servicios medioambientales que prestan los ecosistemas a la sociedad responden al factor ambiental de la vulnerabilidad. La valoración económica del servicio procurado por especies como bosques, matorrales, pastizales, tierras de labor en secano, herbazales, etc. está recogida en la base de datos de la Valoración de los Activos Naturales de España (VANE) elaborada por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino (véase la figura 3.10).

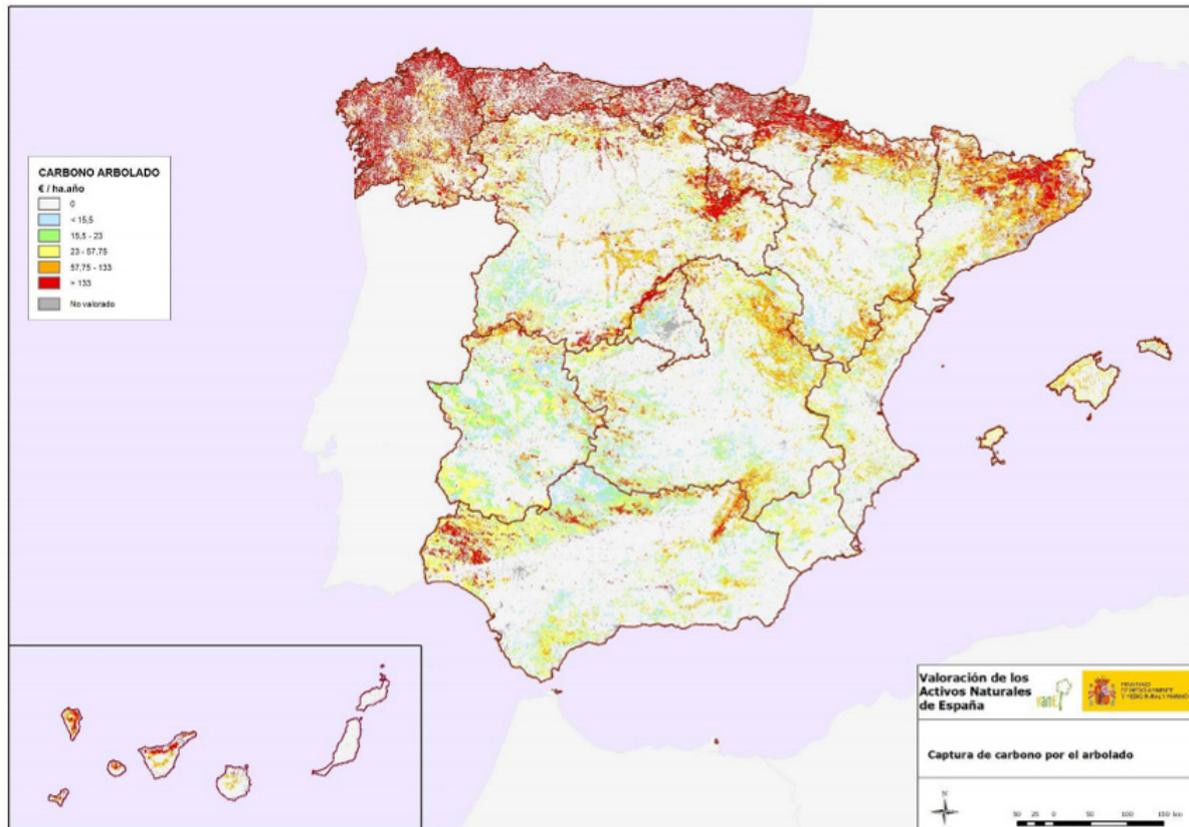


Figura 3.10. Valoración de los Activos Naturales de España (VANE)

La base de datos del VANE está disponible en formato ráster y se ha empleado en este estudio con el objetivo de evaluar las consecuencias económicas en términos de pérdida de servicios ecosistémicos ante el riesgo de inundación. La figura 3.11 muestra la distribución espacial de los servicios ecosistémicos en el litoral del Principado de Asturias.

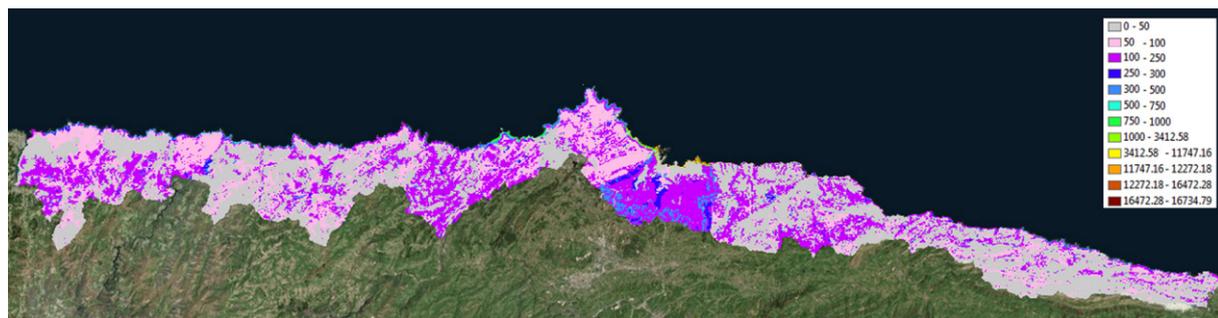


Figura 3.11. Distribución espacial de la Valoración de los Activos Naturales de España (VANE) en el litoral asturiano.

En la figura 3.12 se pueden observar distintas ampliaciones de la figura anterior en las zonas de Coaña y Navia, San Esteban de Pravia, San Juan de la Arena y Avilés, Gijón y Ribadesella en las que se puede apreciar la diferencia en términos de valor económico de los servicios prestados para los distintos ecosistemas.

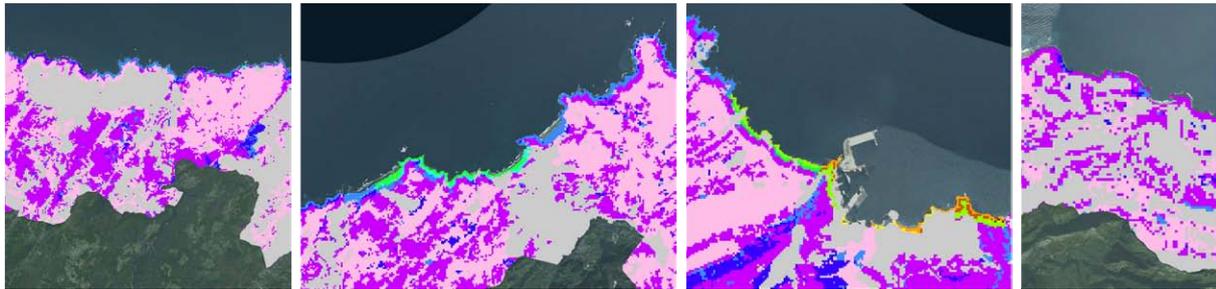


Figura 3.12. Ampliación del la capa ráste del VANE en Coaña y Navia (panel izquierdo), San Esteban de Pravia, San Juan de la Arena y Avilés (panel en centro-izquierda), Gijón (panel en centro-derecha) y Ribadesella (panel derecho).

3.2. Escenarios considerados

En este apartado, y con el objetivo de estudiar el riesgo de inundación sobre el sistema socioeconómico, se define una serie de escenarios de riesgo derivados de la combinación de escenarios climáticos, correspondientes a cambios en el clima, y escenarios no climáticos, asociados a cambios en las variables socioeconómicas. Se han considerado tres horizontes temporales distintos: el clima actual, el año 2050 representativo de las posibles consecuencias a medio plazo, y el año 2100, para evaluar los daños a largo plazo.

Para la definición de los escenarios climáticos se han analizado las dinámicas marinas mediante el estudio de tendencias históricas basadas en observaciones y proyecciones para escenarios basados en Rutas Representativas de Concentración (RCP) de gases de efecto invernadero (véase el informe de la Tarea 2.3). Por no ser significativos los resultados obtenidos para el oleaje y la marea meteorológica, sólo se han tenido en cuenta las proyecciones de aumento del nivel medio del mar. En base a los horizontes temporales propuestos, se han configurado 9 escenarios que combinan eventos extremos de 100 y 500 años de periodo de retorno con aumentos del nivel del medio del mar de +0.24 m, +0.45 m (valor medio del escenario RCP4.5 del IPCC en la costa asturiana modificado localmente con Slangen et al., 2014), +0.65 m (valor medio del escenario RCP8.5 del IPCC en la costa asturiana modificado localmente con Slangen et al., 2014) y +1 m de subida del nivel del mar, éste último representa un escenario más pesimista y conservador pero que no debe desecharse.

A continuación, se muestra una tabla con los escenarios climáticos que se plantean:

AÑO HORIZONTE	INUNDACIÓN PERMANENTE – SLR (m)			EVENTOS EXTREMOS – CI (T= Periodo de Retorno)	
	RCP4.5	RCP8.5	High++		
2050	SLR1=0.24			-	T1=100 T2=500
2100	SLR2=0.45	SLR3=0.65	SLR4=1	T1=100	T2=500

Tabla 3.1. Escenarios climáticos propuestos para el estudio del riesgo de inundación. Nota: los valores de SLR2 y SLR3 que se muestran en la tabla corresponden a los valores medios de los RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente, en la costa asturiana.

Los escenarios no climáticos responden a cambios las variables socioeconómicas tales como la población, la renta per cápita, el stock de capital y el Valor Añadido Bruto (VAB). Se han definido 3 escenarios no climáticos, uno para cada horizonte temporal planteado, considerando para el escenario representativo del clima presente los valores actuales de cada variable de estudio.

En lo que respecta a la población, para el año horizonte 2050 se han asumido las proyecciones del gobierno del Principado de Asturias, que llegan hasta 2030 y cuya tasa anual de crecimiento negativo es del 0.437%. Sin embargo, para 2100, dada la tendencia de decrecimiento de la población tan pronunciada que presentan las proyecciones, se ha decidido asumir la hipótesis razonable de mantener la población actual.

En el caso de la renta per cápita, el stock de capital y el VAB, se ha realizado la media de los últimos 5, 10, 15, 20, 25, 30,... años y se ha tomado como tasa de cambio la media del crecimiento menor, dato a partir del cual se ha extrapolado a 2050 y a 2100 para cada caso. Las tasas de crecimiento anual obtenidas son positivas para la renta per cápita, el VAB del sector servicios, el stock de capital de vivienda y el stock de capital industrial, y nulas para el VAB de los sectores agrícola e industrial. Por estar los datos de stock de capital de vivienda e industrial agregados a nivel provincial, la tasas de crecimiento de los mismos son 1.946% y 2.52%, respectivamente, para cada concejo. Las proyecciones de renta per cápita y VAB del sector servicios están desagregadas a nivel de concejo y se encuentran en los rangos 1.4%-2.26% y 1.23%-3.02%, respectivamente.

Cabe puntualizar que tanto la renta per cápita como sus proyecciones no se han empleado como indicadores de la economía de la región sino como instrumentos de reparto, de modo que sea posible medir el impacto económico redistributivo asociado al stock de capital de vivienda, del que se sólo se disponen datos agregados a todo el Principado de Asturias.

La tabla 3.2 muestra un resumen de los escenarios socioeconómicos propuestos:

AÑO HORIZONTE	POBLACIÓN/GDP
Actual	S0
2050	S1
2100	S2

Tabla 3.2. Escenarios socioeconómicos propuestos para el estudio del riesgo de inundación.

La combinación de escenarios climáticos y no climáticos para el clima presente, 2050 y 2100 dan lugar a escenarios de riesgo que se proponen a continuación:

Escenario 1.- T1, S0 - Clima presente: escenario de inundación del evento extremo de 100 años de periodo de retorno cuyo horizonte temporal es el clima presente. Desde el punto de vista socioeconómico, considera la sociedad actual.

Escenario 2.- T2, S0 - Clima presente: escenario de inundación del evento extremo de 500 años de periodo de retorno cuyo horizonte temporal es el clima presente. Análogamente al Escenario 1, tiene en cuenta las características socioeconómicas de la sociedad actual.

Escenario 3.- SLR1+T1, S1 - Horizonte 2050: en este escenario se propone una combinación del evento extremo de 100 años de periodo de retorno con una subida del nivel del mar de 0.24 m a 2050. Se asumen las proyecciones oficiales de población y se extrapolan las proyecciones de los indicadores económicos a mitad de siglo.

Escenario 4.- SLR1+T2, S1 - Horizonte 2050: este escenario plantea combinar los efectos del evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m al año horizonte 2050. Se asumen, también en este caso, las proyecciones oficiales de población y se extrapolan las proyecciones de los indicadores económicos a mitad de siglo.

Escenario 5.- SLR4, S2 - Horizonte 2100: se trata de un escenario de inundación permanente. Se plantea un incremento del nivel medio del mar de 1 m a 2100, algo pesimista y conservador pero que debe tenerse en consideración. Se asume la hipótesis de mantener la población actual y se extrapolan las proyecciones de los indicadores económicos a final de siglo.

Escenario 6.- SLR2+T1, S2 - Horizonte 2100: este escenario propone la combinación del evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un incremento del nivel medio del mar de 0.45 m al año horizonte 2100 (valor medio del escenario RCP4.5 del IPCC en la costa asturiana modificado localmente con Slangen et al., 2014). La población considerada es la del presente y los valores del resto de variables socioeconómicas son los de las proyecciones extrapoladas a final de siglo.

Escenario 7.- SLR2+T2, S2 - Horizonte 2100: escenario que plantea combinar el evento extremo de 500 años de periodo de retorno con una subida del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio del escenario RCP4.5 del IPCC en la costa asturiana modificado localmente con Slangen et al., 2014). Se asume la población actual y las proyecciones de renta, stock de capital y VAB extrapoladas a final de siglo.

Escenario 8.- SLR3+T1, S2 - Horizonte 2100: escenario propuesto para evaluar la combinación del evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio del escenario RCP8.5 del IPCC en la costa asturiana modificado localmente con Slangen et al., 2014). Se asumen las hipótesis de mantener la población del presente y proyectar los cambios en los indicadores económicos a final de siglo.

Escenario 9.- SLR3+T2, S2 - Horizonte 2100: se propone un último escenario que combina el evento extremo de 500 años de periodo de retorno con la subida del nivel medio del mar a 2100 de 0.65 m (valor medio del escenario RCP8.5 del IPCC en la costa asturiana modificado localmente con Slangen et al., 2014). Análogamente al resto de escenarios representativos del largo plazo, se asume la población actual y las proyecciones de los distintos indicadores económicos a final de siglo.

A continuación, se muestra una tabla resumen con los escenarios de riesgo propuestos en este estudio:

AÑO HORIZONTE	TIPO DE INUNDACIÓN	ESCENARIOS CLIMÁTICOS	ESCENARIOS SOCIOECONÓMICOS	ESCENARIOS DE RIESGO
Actual	CI	T1	S0	Escenario1
		T2	S0	Escenario2
2050	CI	T1+SLR1	S1	Escenario3
		T2+SLR1	S1	Escenario4
2100	SLR	SLR4	S2	Escenario5
	CI	T1+SLR2	S2	Escenario6
		T2+SLR2	S2	Escenario7
		T1+SLR3	S2	Escenario8
		T2+SLR3	S2	Escenario9

Tabla 3.3. Escenarios de riesgo propuestos para el estudio del riesgo de inundación.

Por otro lado, el análisis del riesgo de erosión a causa del cambio climático requiere de la definición de escenarios representativos de cambios en clima. La variable escogida es el aumento del nivel medio del mar. Los horizontes temporales considerados son el año 2050 y el año 2100, de modo que se pueda estimar la magnitud de las consecuencias a lo largo del siglo XXI.

Los escenarios climáticos propuestos para este análisis son los siguientes:

Escenario SLR1 - subida del NMMR de 24 cm a 2050: este escenario tiene en cuenta una subida del nivel del mar de 24 cm a medio plazo, para el año horizonte 2015.

Escenario SLR2 - subida del NMMR de 45 cm a 2100: en este escenario se propone una subida del nivel del mar de 45 cm que corresponde al escenario RCP4.5 del IPCC regionalizado en Asturias. Se trata de un aumento del nivel medio del mar a largo plazo, para el año horizonte 2100.

Escenario SLR3 - subida del NMMR de 65 cm a 2100: este escenario contempla una subida del nivel del mar de 65 cm que corresponde al escenario RCP8.5 del IPCC regionalizado en Asturias. Se propone un aumento del nivel medio del mar a largo plazo, para el año horizonte 2100.

Escenario SLR4 - subida del NMMR de 1 m a 2100: este escenario refleja una subida del nivel del mar de 1 m a 2100, un escenario más pesimista y conservador basado en modelos semi-empíricos que debe tenerse en consideración.

A continuación, se presenta una tabla resumen:

AÑO HORIZONTE	INUNDACIÓN PERMANENTE, SLR (m)		
	RCP4.5	RCP8.5	High+ +
2050	SLR1=0.24		-
2100	SLR2=0.45	SLR3=0.65	SLR4=1

Tabla 3.4. Escenarios climáticos propuestos para el estudio del impacto de erosión

Dada la gran variabilidad asociada al proceso de evaluación del valor recreativo de las playas se ha considerado razonable asumir la hipótesis de mantener constante la estructura salarial de la sociedad, las preferencias de los usuarios y los servicios complementarios que ofrecen a día de hoy las playas objeto de este estudio. Los escenarios de riesgo propuestos, por tanto, únicamente contemplan cambios en el clima.

Finalmente, se muestra una tabla resumen de los escenarios de riesgo considerados para estimar el alcance de las consecuencias del cambio climático sobre el turismo:

AÑO HORIZONTE	TIPO DE INUNDACIÓN	ESCENARIOS CLIMÁTICOS	ESCENARIOS SOCIOECONÓMICOS	ESCENARIOS DE RIESGO
2050	SLR	SLR1	S0	Escenario1
2100	SLR	SLR2	S0	Escenario2
	SLR	SLR3	S0	Escenario3
	SLR	SLR3	S0	Escenario4

Tabla 3.5. Escenarios de riesgo propuestos para el estudio de riesgo de erosión

3.3. Metodología de análisis

Tal y como se ha planteado en el apartado 2 de este documento, la metodología de análisis propuesta para analizar el riesgo en el litoral asturiano bajo distintos escenarios se enmarca dentro de una metodología más general de riesgo adoptada por el IPCC (IPCC, 2014). En este marco más general, el riesgo (R) se ha definido como la probabilidad de un evento y sus consecuencias negativas como resultado de la combinación de peligrosidad (P), definida a través de las dinámicas marinas, exposición (E), asociada al medio físico, y vulnerabilidad (V), ligada a las características socioeconómicas de la zona, y se expresa mediante la expresión:

$$R = PEV$$

3.3.1. Análisis del riesgo de inundación

Este estudio tiene como objetivo evaluar las consecuencias del riesgo de inundación para los distintos escenarios propuestos en términos de población afectada y de valoración económica de daños ocasionados. Además de esto, se han identificado en cada caso las infraestructuras críticas afectadas.

3.3.1.1. Modelado de inundación

El modelo de inundación utilizado es RFSM-EDA (Gouldby et al., 2008), un modelo hidrodinámico bidimensional que emplea el método de almacenamiento de celdas y que cuenta con la topografía como sub-elemento de la malla computacional. Se basa en 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 et al., 2010).

Durante la simulación hidráulica, el modelo recibe volúmenes de descarga en la llanura de inundación a través de cada IZ costera (véase la figura 3.13). Esos volúmenes de inundación se computan como la diferencia entre el nivel del mar total (denominado TWL

de sus siglas en inglés) del punto más cercano del conjunto de puntos en los que se ha reconstruido la serie de nivel y el correspondiente contorno.

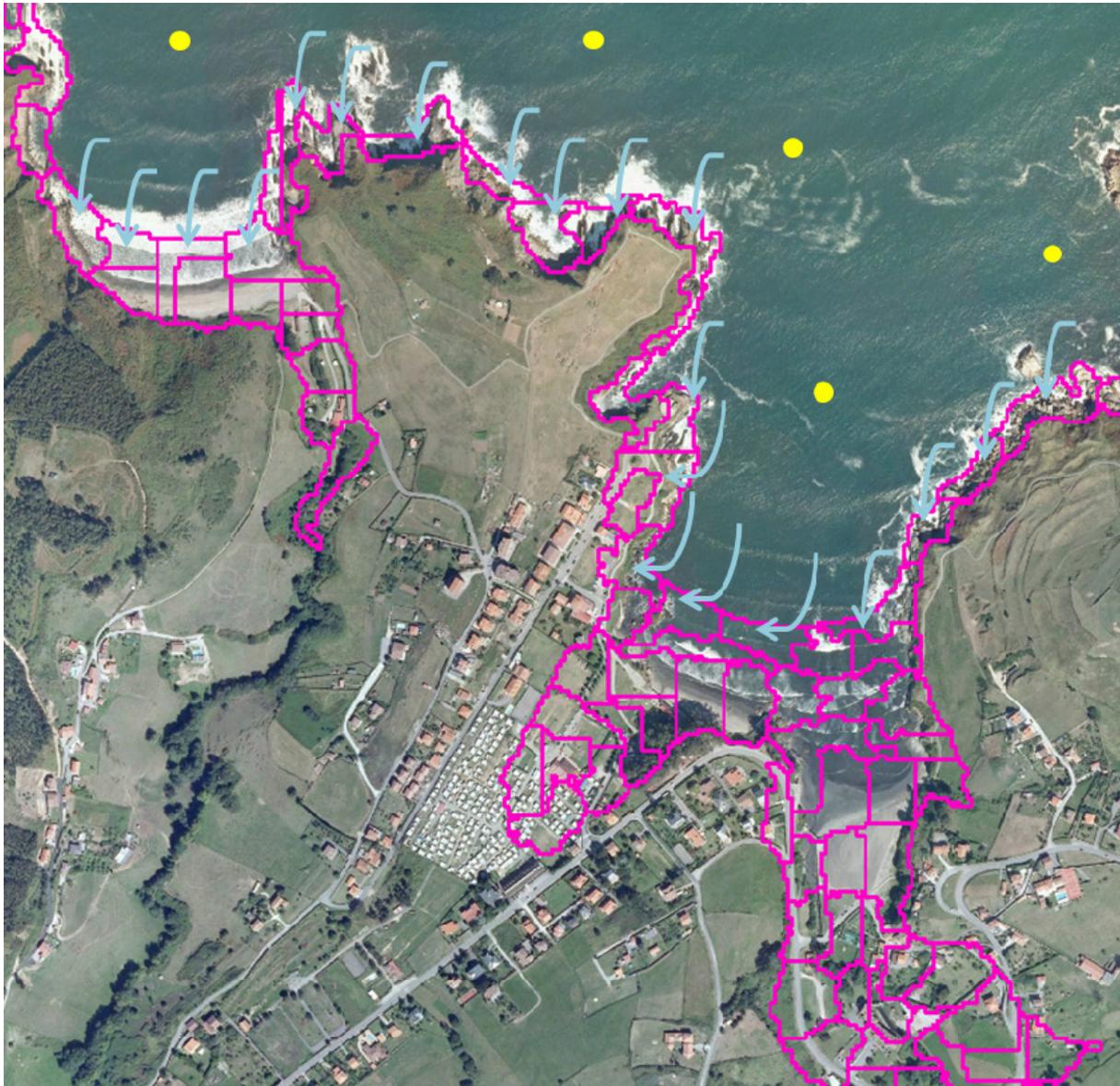


Figura 3.13. Esquema conceptual del funcionamiento del modelo de inundación empleado

3.3.1.2. Exposición

Para determinar la afección causada para cada uno de los escenarios de riesgo propuestos se ha llevado a cabo el cruce de los mapas de inundación con distintas capas SIG (Sistema de Información Geográfica): el ráster de población, los polígonos de los usos del suelo del SIOSE y las capas en formato vectorial de viviendas e instalaciones industriales obtenidas de las bases de datos del IGN BCN25/BTN25.

Con estos datos, el análisis de consecuencias se ha abordado por tres vías distintas:

- Población afectada: se ha determinado el número de habitantes afectados por concejo para cada uno de los escenarios de riesgo planteados.
- Stock de capital afectado: se ha calculado, para cada concejo y escenario propuesto, el área afectada de stock de capital de vivienda e industrial. Estas áreas se han transformado en unidades monetarias constantes asumiendo que las capas vectoriales de viviendas e instalaciones industriales del Principado de Asturias de las que se dispone representan el total del stock de capital de vivienda e industrial agregado de la provincia.
- Valor Añadido Bruto (VAB) afectado: la determinación del VAB relativo al sector industrial afectado se ha llevado a cabo de manera análoga al stock de capital industrial, con la misma capa vectorial y asumiendo el mismo criterio de reparto, pero en este caso desagregado a nivel de concejo. En cuanto a la producción del sector agrícola, se ha empleado la base de datos del SIOSE y, para cada concejo y escenario, se ha determinado el VAB afectado.

3.3.1.3. Cálculo de consecuencias

Tras realizar el cruce de capas SIG se han procesado los datos obtenidos para expresar los resultados en porcentajes respecto al total de cada una de las variables, de acuerdo al contexto socioeconómico considerado en el correspondiente escenario de riesgo. Para los escenarios asociados a eventos extremos, se han aplicado curvas de daño al stock de capital afectado y, por otro lado, se han estimado los días de pérdida de producción industrial y del sector servicios en función de la cota de inundación alcanzada.

A continuación, se detalla el procedimiento para calcular las consecuencias a las que podría enfrentarse la sociedad asturiana ante los escenarios de riesgo propuestos:

- Consecuencias en la población: para evaluar qué consecuencias tendría cada escenario de en la población, se ha determinado el porcentaje de población afectada en cada concejo respecto al total de población del concejo. Tal y como se ha explicado en el apartado 3.2, para los escenarios de clima presente y año horizonte 2100 se ha considerado la población actual y, para los escenarios representativos del riesgo a mitad de siglo, las proyecciones oficiales del gobierno del Principado de Asturias.
- Consecuencias en el stock de capital: el cálculo de las consecuencias en el stock de capital requiere, en los casos de inundación por evento extremo, de la implementación de curvas de daño para obtener el **daño efectivo** en función de la cota de inundación alcanzada. Para el escenario de inundación permanente, sin embargo, se asume que el daño es siempre máximo (total) pues los terrenos inundados quedan anegados y se pierden definitivamente.

Las figuras 3.14 y 3.15 muestran las curvas de daño de viviendas e instalaciones industriales empleadas en este estudio (adaptadas de Gopi Goteti, 2014).

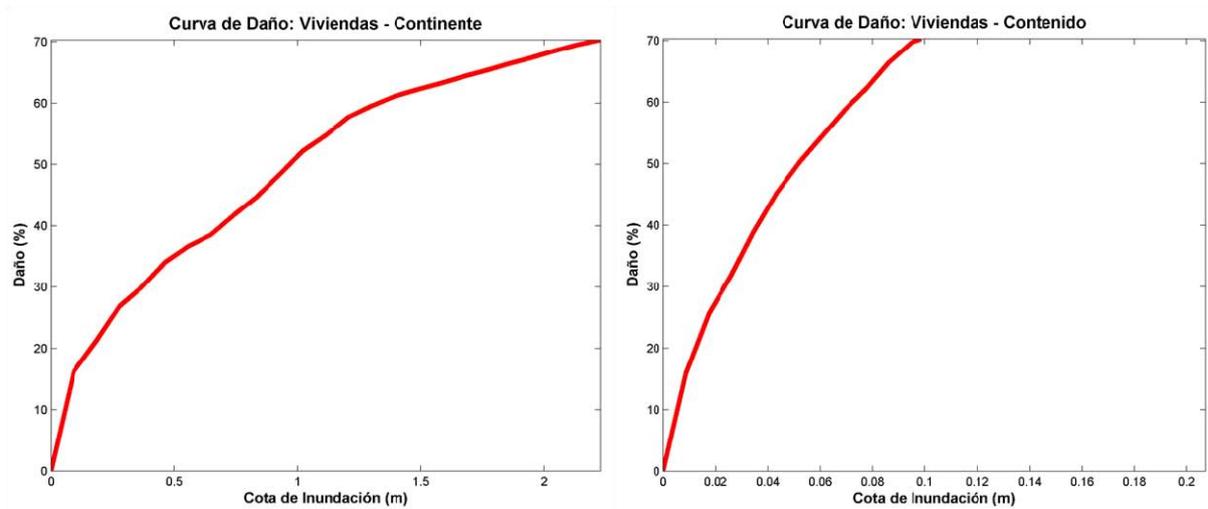


Figura 3.14. Curvas de daño para el continente y el contenido de las viviendas (paneles izquierdo y derecho respectivamente)

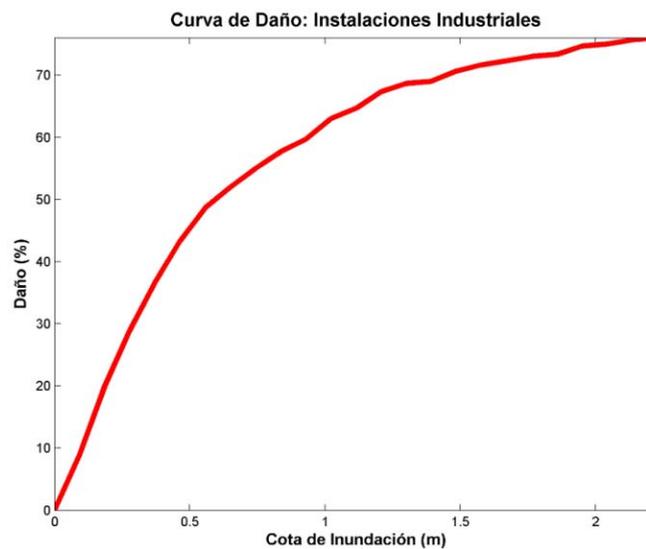


Figura 3.15. Curva de daño para instalaciones industriales

Dado que la información relativa al stock de capital está agregada a nivel provincial, se ha tratado de mejorar la caracterización del tejido urbano mediante la aplicación de un factor corrector en función de la renta (ecuación 3.1) al stock de capital de vivienda.

$$FCR_i = \frac{\text{Renta p.c. media del concejo}_i}{\text{Renta p.c. media de Asturias}} \quad (3.1)$$

Donde FCR_i es el factor corrector en función de la renta del concejo i que resulta de dividir la renta per cápita media de ese concejo entre la renta per cápita media del Principado de Asturias. Esto promueve un reparto del stock de vivienda más equitativo pues los concejos cuya población tenga mayor poder adquisitivo dispondrán de mejores y más costosas residencias.

Para evaluar los daños en el contenido, se ha asumido que el valor del contenido de las viviendas es equivalente a una tercera parte del valor del stock de capital de vivienda de la provincia.

Tras aplicar las curvas de daño en cada vivienda e instalación industrial afectadas para los escenarios de inundación por evento extremo, se ha procedido, para los escenarios propuestos a 2050 y 2100, a proyectar las consecuencias según su evolución tendencial para los distintos horizontes temporales de la siguiente forma:

$$VF = V(1+r)^T \quad (3.2)$$

Donde V corresponde a un valor medido en unidades monetarias constantes, r es la tasa de cambio anual, T es la diferencia en años entre el año horizonte considerado y el año actual y VF es el valor V proyectado al futuro.

Finalmente, para todos los escenarios de riesgo propuestos, se ha calculado el porcentaje de stock de capital afectado respecto del stock de capital total, para cada categoría.

- Consecuencias en el Valor Añadido Bruto (VAB): análogamente a lo expuesto en el caso del stock de capital, los escenarios que consideran inundación permanente y los que tienen en cuenta eventos extremos de inundación reciben un tratamiento distinto en el cálculo de consecuencias sobre la producción de los sectores industrial y servicios.

Los datos de VAB obtenidos de la base de datos de la SADEI representan valores de producción anuales para los distintos sectores y para cada concejo. En el caso de ensayar las consecuencias derivadas de un escenario de inundación permanente se debe asumir que, en las zonas inundadas, las pérdidas de producción son totales. Sin embargo, cuando se analizan los posibles daños causados por inundaciones asociadas a eventos extremos, la producción se pierde durante un tiempo tras el cual se vuelve a recuperar. En este estudio se ha establecido una relación entre la cota de inundación alcanzada en las distintas zonas afectadas y los días de pérdida de producción (véase la tabla 3.6).

COTA DE INUNDACIÓN	DÍAS DE PÉRDIDA DE PRODUCCIÓN	TIPO DE INUNDACIÓN
CI ≤ 0.5 m	2	Evento Extremo
0.5 m < CI ≤ 1 m	5	Evento Extremo
1 m < CI ≤ 1.5 m	10	Evento Extremo
CI > 1.5 m	15	Evento Extremo
CI > 0	365	Inundación Permanente

Tabla 3.6. Criterios de corrección de la pérdida de producción de los sectores industrial y servicios en función de la cota de inundación alcanzada y del tipo de inundación.

El cálculo de las consecuencias sobre el VAB del sector agrícola, por otro lado, recibe el mismo tratamiento independientemente del tipo de inundación que se esté considerando. En la realidad, si inundación que se produce es de tipo permanente, la pérdida es total pero, si ésta es debida a eventos extremos, dependerá del momento en el que se produzca tal evento, es decir, si la inundación tiene lugar antes de la cosecha, se perderá

todo, y si tiene lugar tras la misma, no habrá prácticamente daños. Como este dato no puede conocerse se ha asumido la situación más pesimista, que es la de considerar, en cualquier caso, la pérdida total de la producción.

Una vez se ha llevado a cabo el cálculo de la producción perdida por inundación para cada escenario, se ha realizado la proyección de los resultados correspondientes a los horizontes temporales 2050 y 2100 y se ha determinado el porcentaje de VAB perdido respecto al VAB total de cada sector.

Por otro lado, para poder tratar de manera homogénea las consecuencias derivadas de los escenarios planteados a medio y a largo plazo y hacerlos así comparables entre ellos y con el contexto socioeconómico actual, es necesaria la aplicación de una tasa de descuento de manera que no sólo estén expresados en unidades monetarias constantes del presente sino que, además, se haya tenido en cuenta el impacto diferenciado entre distintos años horizonte.

La tasa de descuento representa la tasa de coste anual que deducimos de los beneficios futuros, y se calcula del siguiente modo:

$$VA = \frac{VF}{(1+r)^T} \quad (3.3)$$

Donde VF es cualquier valor proyectado a un año horizonte, r es la tasa de descuento aplicada, T es la diferencia en años entre el año horizonte considerado y el año actual y

VA es el valor VF actualizado y expresado en unidades monetarias constantes.

La no inclusión del descuento en estos términos proporcionaría un resultado tal y como lo vería la sociedad perceptora en la fecha en la que los daños fuesen percibidos. Sin embargo, si el objetivo que se persigue es el de contabilizar daños en ausencia de medidas, o bien determinar el total de los activos en riesgo, es necesario descontar para poder comparar datos en distintos momentos. Un mismo dato, por tanto, puede aparecer descontado o sin descontar según el uso que se haga del mismo, lo que debe especificarse en cada caso con las notas aclaratorias pertinentes, no obstante, siempre se medirán en unidades monetarias constantes del presente.

Una cuestión esencial que se deriva de la descripción realizada es la elección de tasas de descuento consistentes en los escenarios a corto y largo plazo. En efecto, en el caso de los escenarios a corto plazo, se trata de un problema clásico de inversión en que la justificación de un proyecto son los servicios percibidos por la misma generación que soporta sus costes. El requisito de aplicación de la tasa de descuento para considerar el coste de oportunidad de los recursos se cumplimenta con una tasa ligada a la comparación de la rentabilidad de los proyectos abordados y de los proyectos rechazados, que representan el coste de oportunidad, lo cual lleva a abordar un descuento cercano a la rentabilidad de los proyectos abordados. Sin embargo, cuando se afrontan escenarios a muy largo plazo, surgen consideraciones éticas que invitan a limitar las tasas de descuento a valores muy inferiores ya que los beneficios a percibir o los costes a evitar se sitúan en periodos muy alejados, siendo por tanto generaciones distintas quienes perciben los beneficios futuros y quienes soportan los costes en el presente. El carácter intergeneracional de la transacción resulta en este caso de gran

importancia para entender que, el hecho de reducir la índole de los beneficios futuros, si bien está teóricamente justificado a partir de una comparación de las expectativas renta crecientes junto con una utilidad marginal del dinero decreciente cuando se trata de proyectos de base monetaria, resulta mucho más complejo de tratar cuando se están evitando daños que serán irreversibles cuando se sufran en el futuro. Serán en su momento daños del presente de quienes lo sufran, y resultará en ese momento inaceptable haber incurrido en una minusvaloración desmesurada de los costes que pudieron haber sido evitados por parte de una generación anterior que habrá renunciado a sacrificar unos recursos que difícilmente iba a recuperar.

En este estudio se han seguido las pautas establecidas en el HMTO Green Book (2011) donde se recomiendan tasas de descuento reducidas para proyectos a largo plazo respecto de las fijadas en proyectos a corto plazo y medio plazo. Por otro lado, se recomienda calcular el tipo de actualización de flujos a partir del tipo de crecimiento que, en este caso, es de tipo tendencial aproximado al mínimo observado en los últimos años. En este sentido, se han empleado unas tasas de descuento del 2% para el año horizonte 2050 y del 1% para el año horizonte 2100. Esta elección implica que un mismo daño a sufrir por un sujeto a plazo medio será sometido a un descuento distinto cuando se enmarque en una corriente de daños asociada al largo, medio o corto plazo.

3.3.1.4. Cálculo del incremento del riesgo

La gestión del riesgo asociado al cambio climático requiere de una estrategia sostenida, según cada sector o sistema, a distintos horizontes temporales. En este estudio se propone como objetivo mantener el nivel de riesgo actual. Para ello, es necesario disponer de la distribución espacial del riesgo y conocer así las localizaciones que constituyen una prioridad para la implementación de medidas de adaptación.

Dado el concepto de riesgo adoptado en este análisis, entendido como la combinación de la peligrosidad, exposición y vulnerabilidad, se plantea a continuación una distribución espacial del mismo para cada escenario propuesto (véanse las figuras 3.15 - 3.23). La metodología empleada se basa en reescalar el rango de valores que asume cada variable socioeconómica considerada en 4 categorías: riesgo bajo (valor 1), riesgo moderado (valor 2), riesgo moderado-alto (valor 3) y riesgo alto (valor 4). Los umbrales que limitan cada categoría se han establecido a partir de los máximos alcanzados en el escenario 1, correspondiente al clima presente y asumido como el nivel de riesgo actual. Una vez llevado a cabo el redimensionamiento de las escalas de valores iniciales para cada escenario, se ha otorgado, en base a criterio experto, un peso a cada indicador socioeconómico. De este modo la población afectada representa un 35% del nivel de riesgo, la suma del stock de capital afectado otro 35% (15% correspondiente al stock de capital industrial, 15% al continente del stock de capital de vivienda y 5% al contenido del stock de capital de vivienda) y la suma del VAB afectado un 30%, éste último repartido equitativamente entre los flujos industrial, agrícola y de producción de servicios ecosistémicos.

La figura 3.16 muestra la distribución espacial del riesgo para el clima actual. Se puede observar cómo el único concejo con nivel de riesgo moderado-alto es el de Muros de Nalón, que presenta riesgos considerables para la población, a producción agrícola y la relacionada con los servicios ecosistémicos prestados.

Escenario 1.- CLIMA PRESENTE: Tr1=100, S0



Figura 3.16. Distribución espacial del riesgo actual, correspondiente al Escenario 1: evento extremo de 100 de periodo de retorno y condiciones socioeconómicas S0.

La siguiente figura presenta la distribución del nivel de riesgo asociado al evento de 500 años de periodo de retorno en el clima actual. Las diferencias con respecto al nivel de riesgo asociado al evento de 100 años de periodo de retorno, asumido como el riesgo actual, son sólo apreciables en el concejo de Llanes, donde el riesgo aumenta de categoría 2 a categoría 3 pues población y stock de capital de vivienda se encuentran en un nivel de riesgo alto.

Escenario 2.- CLIMA PRESENTE: Tr2=500, S0



Figura 3.17. Distribución espacial del riesgo correspondiente al Escenario 2: evento extremo de 500 de periodo de retorno y condiciones socioeconómicas S0.

Dada la sensibilidad de los resultados a las proyecciones de los datos socioeconómicos y, aún más, a la tasa de descuento empleada, se ha considerado oportuno mostrar la distribución del nivel de riesgo de cada escenario sin cambios en las variables socioeconómicas (S0), con las variables socioeconómicas proyectadas a los horizontes temporales considerados (S1) sin descontar y con las variables socioeconómicas proyectadas a los horizontes temporales considerados descontadas (descontado).

La figura 3.18 muestra el nivel de riesgo alcanzado bajo las hipótesis asumidas en el escenario 3. Se puede observar como los efectos del aumento del nivel medio del mar incrementan el nivel de riesgo, respecto al riesgo actual, de 1 a 2 en Cudillero y de 2 a 3 en Castropol, Navia, Soto del Barco y Llanes. Por otro lado, asumiendo la proyección de los indicadores socioeconómicos, se puede ver cómo el riesgo aumenta considerablemente, alcanzándose un nivel alto en Muros de Nalón, que presenta valores de riesgo elevados para la población y los flujos de producción. Los resultados del nivel de riesgo tras aplicar una tasa de descuento del 2% son similares a los obtenidos considerando exclusivamente cambios en variables climáticas.

Escenario 3.- HORIZONTE= 2050: Tr1=100 + SLR1= 0.24 m



Figura 3.18. Distribución espacial del riesgo correspondiente al Escenario 3: evento extremo de 100 de periodo de retorno con aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050 y condiciones socioeconómicas S0, S1 sin descontar y S1 descontado.

La siguiente figura representa la distribución espacial del nivel de riesgo asociado al evento de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a mitad de siglo. Sin tener en cuenta cambios en las variables socioeconómicas, los concejos que alcanzan un nivel moderado-alto son Castropol, Navia, Valdés, Muros de

Nalón, Soto del Barco y Castrillón, todos ellos presentando un nivel de riesgo elevado para el VAB industrial. Si se tienen en cuenta las proyecciones socioeconómicas, se puede apreciar cómo Muros de Nalón y Soto del Barco alcanzan un nivel de riesgo elevado. Análogamente a lo observado en el escenario 3, el nivel de riesgo alcanzado en los distintos concejos tras descontar los daños es parecido al obtenido proyectar los datos.



Figura 3.19. Distribución espacial del riesgo correspondiente al Escenario 4: evento extremo de 500 de periodo de retorno con aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050 y condiciones socioeconómicas S0, S1 sin descontar y S1 descontado.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el escenario de inundación permanente (véase la figura 3.20) debida al aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100. En comparación al nivel de riesgo actual, se puede observar cómo Villaviciosa pasa de la categoría de riesgo bajo a la categoría de riesgo moderado y los concejos de Navia Soto del Barco incrementan su nivel de riesgo de 2 a 3. Esto ocurre dada la extensión de zonas bajas que quedarían anegadas en las márgenes de las rías de Navia y Nalón. En base a los niveles de riesgo alcanzados tras proyectar los indicadores socioeconómicos, ningún concejo presenta un nivel de riesgo elevado pero sí son muchos lo que se encuentran en torno a un nivel moderado-alto.



Figura 3.20. Distribución espacial del riesgo correspondiente al Escenario 5: inundación permanente debida a un aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100 y condiciones socioeconómicas S0, S1 sin descontar y S1 descontado.

La figura 3.21 muestra, sin tener en cuenta las proyecciones de los datos socioeconómicos un nivel de riesgo alto para el concejo de Muros de Nalón, lo que pone de manifiesto su vulnerabilidad ante los efectos del cambio climático. Si se tienen en cuenta las proyecciones de las distintas variables no climáticas, el nivel de riesgo aumenta en la mayoría de concejos, alcanzando Navia y Soto del Barco un nivel de riesgo elevado, como ocurre en Muros de Nalón. Tras aplicar una tasa de descuento del 1%, los niveles de riesgo alcanzados son algo más pesimistas que en caso de no tener en cuenta las proyecciones socioeconómicas manteniendo Navia, Muros de Nalón y Soto del Barco en alerta roja y la mayoría del resto de concejos en un rango de nivel de riesgo de 2 a 3.



Figura 3.21. Distribución espacial del riesgo correspondiente al Escenario 6: evento extremo de 100 de periodo de retorno con aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 y condiciones socioeconómicas S0, S1 sin descontar y S1 descontado.

La siguiente figura representa los niveles de riesgo derivados del escenario asociado al evento extremo de 500 años de periodo de retorno y un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100. Los resultados arrojan niveles de riesgo parecidos a los obtenidos para el escenario 7 con un incremento de nivel moderado-alto a alto en Navia, en caso de sólo tener en cuenta los cambios en las variables climáticas, y de bajo a moderado-alto y de moderado a moderado-alto en los casos de Avilés y Villaviciosa, respectivamente, si se tienen en cuenta cambios en las variables no climáticas.



Figura 3.22. Distribución espacial del riesgo correspondiente al Escenario 7: evento extremo de 500 de periodo de retorno con aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 y condiciones socioeconómicas S0, S1 sin descontar y S1 descontado.

La figura 3.23 muestra la distribución espacial del riesgo bajo las hipótesis asumidas en el escenario 8. Los resultados no discrepan respecto a los obtenidos en el escenario 7, sin embargo, en comparación con el nivel de riesgo actual y si no se tienen en cuenta las proyecciones socioeconómicas, concejos tales como Coaña, Cudillero y Llanes evolucionan de un nivel de riesgo bajo a un nivel de riesgo moderado, Castropol, Valdés Soto del Barco, Castrillón, Avilés y Ribadesella alcanzan niveles de riesgo moderado-alto y Navia y Muros de Nalón asumen una categoría de riesgo 4. Si se tienen en cuenta cambios en las variables socioeconómicas, sólo los concejos de Pravia y Caravia mantienen un nivel de riesgo bajo en caso de no descontar y, en caso de descontar, a ellos se sumaría Carreño.



Figura 3.23. Distribución espacial del riesgo correspondiente al Escenario 8: evento extremo de 100 de periodo de retorno con aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 y condiciones socioeconómicas S0, S1 sin descontar y S1 descontado.

Finalmente, la figura 3.24 muestra los niveles de riesgo más pesimistas pues responden a las consecuencias asociadas a un evento extremo de 500 años de periodo de retorno y un aumento de 0.65 m de nivel a 2100. Se puede observar cómo Gijón asume un rango de niveles de riesgo de moderado-alto a alto. En la línea de los resultados obtenidos, los concejos de Navia, Muros de Nalón y Soto del Barco son los que alcanzan niveles de riesgo elevados.



Figura 3.24. Distribución espacial del riesgo correspondiente al Escenario 2: evento extremo de 500 de periodo de retorno con aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 y condiciones socioeconómicas S0, S1 sin descontar y S1 descontado.

A continuación, la figura 3.25 muestra una síntesis de los resultados obtenidos.

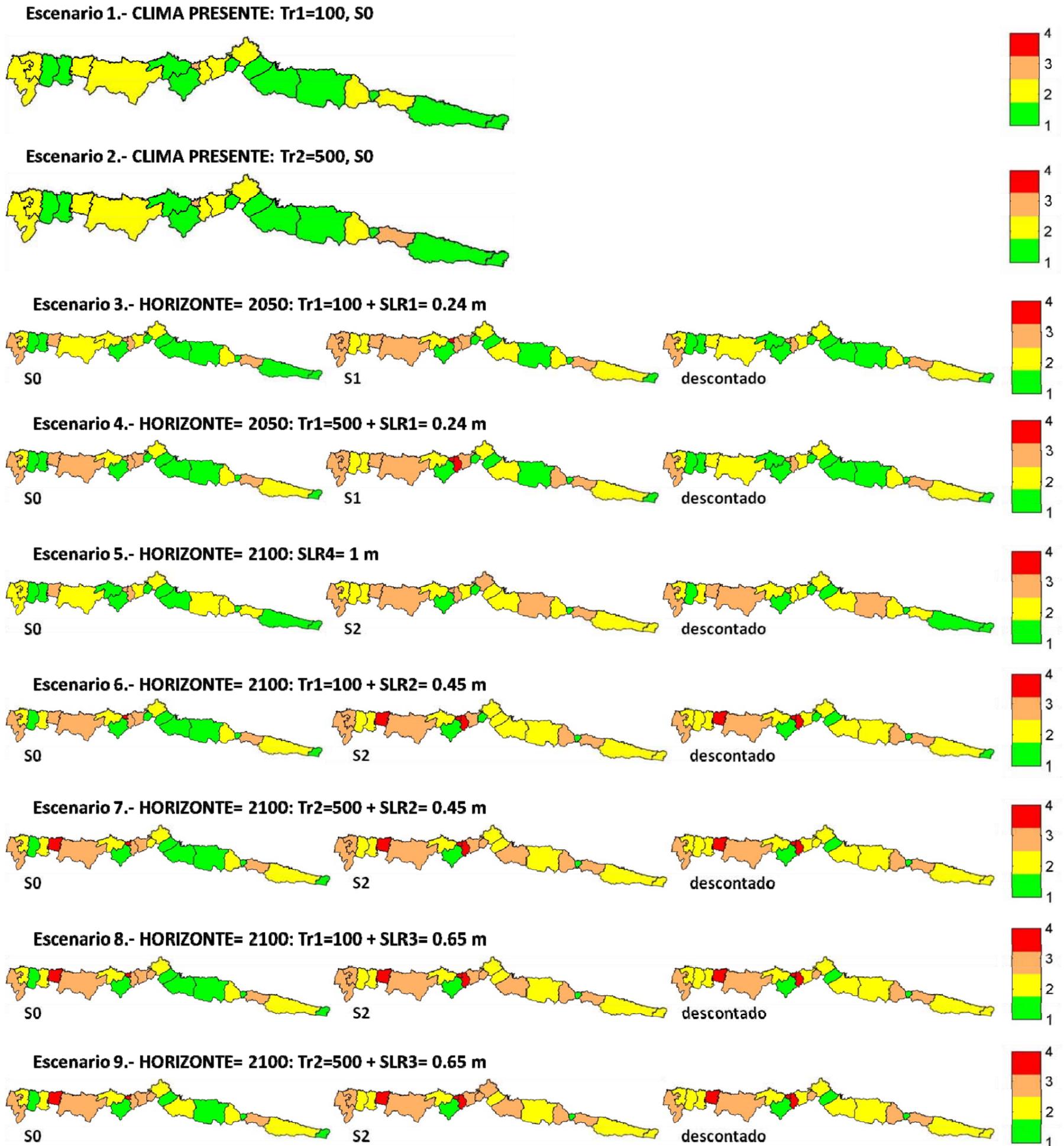


Figura 3.25. Distribución espacial del riesgo para los escenarios propuestos.



Figura 3.26. Distribución espacial de los concejos costeros del litoral asturiano.

3.3.1.5. Identificación de subsistemas críticos

Las Infraestructuras Críticas (IC) según se definen en la Ley 8/2011, de 28 de abril, por la que establecen medidas para su protección, engloban el conjunto de recursos, servicios, tecnologías de la información y redes que, en el caso de sufrir daños, causarían gran impacto en la seguridad, tanto física como económica, de los ciudadanos o del buen funcionamiento del sistema. De acuerdo a la clasificación establecida en el Plan Nacional de Infraestructuras Críticas, y teniendo en cuenta que este estudio pretende evaluar el riesgo de inundación, se ha llevado a cabo una selección de capas vectoriales de las bases de datos BNC25/BTN25 que incluyen los siguientes elementos: torres de alta tensión, depósitos, antenas, depuradoras y sistemas de bombeo, centrales eléctricas, transformadores eléctricos, hospitales, instalaciones de industrias alimentarias, estaciones de ferrocarril, infraestructuras de carreteras, infraestructuras aeroportuarias, líneas de ferrocarril, carreteras convencionales y autopistas/autovías.

La figura 3.27 muestra la distribución espacial de las infraestructuras críticas localizadas en el litoral asturiano.



Figura 3.27. Distribución espacial de las infraestructuras críticas en el litoral de Asturias

La siguiente figura muestra algunas ampliaciones de la figura 3.28 en las zonas de Cueva, San Juan de la Arena, Avilés y Gijón.



Figura 3.28. Ampliación de las capas de infraestructuras críticas seleccionadas en las zonas de Cueva (panel izquierdo), San Juan de la Arena (panel centro-izquierda), Avilés (panel centro-derecha) y Gijón (panel derecho).

Cabe añadir que para realizar una buena caracterización de las infraestructuras críticas en la zona de estudio, sería necesario incluir las redes de saneamiento y abastecimiento, algo que no se ha hecho en este estudio por no disponer de la información necesaria.

3.3.1.6. Limitaciones

La estimación del riesgo planteada supone un paso más en el estudio del cambio climático en la costa y sienta bases más sólidas para el planteamiento de estrategias y medidas de adaptación. Sin embargo, hay que tener en cuenta que existen ciertas limitaciones que deben tenerse en cuenta para interpretar de forma adecuada los resultados.

Los distintos indicadores de la economía de la región empleados en la valoración de las consecuencias derivadas de los escenarios propuestos provienen de distintas fuentes, periodos de tiempo y escalas espaciales, con distintos niveles de incertidumbre asociados.

Los datos de VAB y renta per cápita descargados de la página web de la SADEI están desagregados a nivel de concejo por lo que no ha sido necesario llevar a cabo ninguna reducción de escala. Sin embargo, los datos relativos al stock de capital obtenidos de la Fundación BBVA responden a una agregación provincial por lo que se han extraído los resultados en cada concejo asumiendo un ratio €/ha homogéneo en todo el Principado de Asturias, lo cual no es correcto. Para minimizar este error, tal y como se ha expuesto en el apartado 3.3.3, se ha aplicado un coeficiente reductor en función de la renta per cápita.

De acuerdo a lo descrito en el apartado 3.1.2, la capa SIG de la base de datos del SIOSE está configurada por polígonos que contienen la agregación de distintas categorías de terreno. De este modo es posible conocer qué porcentaje de cada uno del suelo se encuentra en cada polígono pero no su distribución espacial celda a celda. En el caso de polígonos totalmente inundados, no hay mayor limitación que la propia de utilizar datos a escala 1:25000, sin embargo, si el polígono se inunda parcialmente, el grado de incertidumbre aumenta pues se pueden tomar como afectados usos que en realidad no lo están. Para los usos del suelo residencial e industrial, se ha sustituido la base de datos del SIOSE por capas vectoriales de las bases de datos BCN25/BTN25 del IGN. No obstante, para los usos del suelo de los sectores agrícola y servicios no ha sido posible encontrar una alternativa que pudiese mejorar la fiabilidad de los resultados.

Por otro lado, la construcción de escenarios socioeconómicos plausibles tomando la media de crecimiento menor y extrapolando a los distintos horizontes temporales considerados es adecuada para estimar hasta dónde se podría llegar en caso de no actuar frente al cambio climático, pero en ningún caso para pronosticar daños.

Finalmente, y respecto a la evaluación de consecuencias económicas, cabe mencionar que problema de evaluar y comparar fenómenos que ocurren en distintos momentos del tiempo se resuelve introduciendo una tasa de descuento que minimiza el peso de los daños a medida que se alejan en el tiempo. Como resultado de aplicar este método, se tiene una idea de la cuantía del esfuerzo inversor que resultaría tolerable en el presente para resolver problemas de daños futuros. Sin embargo, eso hace que se vea de forma distorsionada la importancia de eventos que pese a ser graves están alejados en el tiempo. En este estudio se han obtenido los resultados de las dos formas, sin descontar

para caracterizar la gravedad de un escenario, y descontado para evaluar la importancia relativa de los escenarios en distintos años horizontes. De esta manera se puede separar la gravedad del escenario y la urgencia que representa según el momento en que se espera su ocurrencia. Las cifras descontadas indican el esfuerzo que la sociedad presente asumiría como máximo para evitar el daño esperado en el año horizonte, como evento único, asumiendo la tasa de descuento empleada como representativa de sus decisiones inversoras.

3.3.2. Análisis del riesgo de erosión

Dada la importancia del uso de esparcimiento y ocio que ofrecen las playas, y a efectos de pérdida de turismo, se ha procedido a evaluar las consecuencias del riesgo de erosión en términos de pérdida de valor de uso recreativo.

3.3.2.1. Modelado de la erosión

En este estudio se ha optado por la aplicación de modelos de equilibrio basados en el perfil transversal de playa para reproducir la evolución estacional y decadal de la línea de costa, considerando que los procesos transversales son aquellos que gobiernan las variaciones estacionales e interanuales de la mayoría de los sistemas morfodinámicos del litoral asturiano (la mayor parte de ellos son sistemas semicerrados).

Se ha aplicado la 'Regla de Bruun' (Bruun, 1954, 1962, 1983), para explicar el retroceso frente al aumento del nivel del mar. Esta se basa en la suposición de que el perfil conserva su forma promedio en relación al nivel del mar. Por ello, la forma del perfil contiene toda la información necesaria para predecir la respuesta a una sobreelevación por aumento del nivel del mar. Para mantener la forma del perfil, la parte superior del perfil se erosiona y la parte más baja se incrementa, trasladando el litoral hacia la tierra.

3.3.2.2. Exposición

Con el fin de caracterizar la erosión en la costa de Asturias, se han escogido 57 playas del Principado de acuerdo a los siguientes criterios:

- ✓ Longitud: igual o mayor a 200 metros
- ✓ Tipología de sedimento: arena
- ✓ Hipótesis: todas las playas son encajadas

Un parámetro importante en la forma del perfil es la profundidad de cierre (h^*), límite a partir del cual el oleaje deja de influir en la forma del perfil. El valor medio anual de la profundidad de cierre, relacionada con la zona activa de transporte sedimentario, depende de la altura de ola que es superada 12 horas al año (H_{s12}), de la sucesión de los temporales y de la persistencia de los mismos. Otro parámetro físico relevante es el tamaño representativo del sedimento (D_{50}). En base a estudios realizados, para arenas de playas en el Cantábrico, se puede considerar como cota inferior y superior 0.23 y 0.28 mm, respectivamente. A falta de información, se ha asumido un tamaño medio homogéneo de sedimento para todas las playas de 0.26 mm. También a falta de datos de campo, se ha medido la altura de la berma de cada playa a partir del Modelo Digital de Terreno basado en datos LIDAR de 5 metros de resolución horizontal del que se dispone. La anchura media de cada playa se ha tomado de cartografía descargable de la "Guía de playas de España" del MAGRAMA.

3.3.2.3. Cálculo de consecuencias

Asumiendo que el uso recreativo es una de las principales funciones de una playa y que su pérdida afectaría de forma directa a la afluencia de turismo en la región, se ha determinado el valor de uso recreativo por metro de playa de cada una de las playas de estudio.

La aproximación empleada consiste en:

1. Evaluación del espacio utilizado por un usuario de la playa.
2. Evaluación del número de horas al año de servicio recreativo, considerando tanto la duración de la temporada como la jornada diaria, así como una estimación de la tasa efectiva de utilización.
3. Cuantificación del valor de uso recreativo por metro cuadrado de playa.
4. Valoración económica y contable de la pérdida de playa seca

Espacio mínimo de playa requerido por persona

El espacio mínimo que requiere una persona en una playa se cuantifica a partir de los siguientes parámetros:

- Se establece un grupo medio formado por 2 personas.
- El espacio utilizado por un grupo medio es de 30 m².

En consecuencia, se establece un espacio requerido de 15 m² por persona.

Horas de utilización de playa

Para cuantificar las horas de utilización de playa se han asumido las siguientes hipótesis:

- Duración de la temporada: 91 días.
- Duración de la jornada: 10 horas.
- Tasa de uso mensual, semanal y diaria de acuerdo a la siguiente tabla:

MES	% DÍAS DE USO	% HORAS DE USO	TASA MEDIA DE OCUPACIÓN (%)	HORAS POTENCIALES	HORAS EFECTIVAS
Enero	0	0	0	310	0
Febrero	0	0	0	280	0
Marzo	0	0	0	310	0
Abril	5	60	22	300	1.98
Mayo	10	60	22	310	4.09
Junio	60	80	53	300	76.32
Julio	80	100	64	310	158.72
Agosto	90	100	64	310	178.56
Septiembre	40	80	53	300	50.88
Octubre	10	60	22	310	4.09
Noviembre	5	10	10	300	0.15
Diciembre	0	0	0	310	0
MEDIA ANUAL	25%	46%	26%	2.2	
MEDIA TEMPORADA	58%	70%	39%	46.6	
SUMA					474.79

Tabla 3.7. Tasa mensual, semanal y diaria de utilización de playa.

Se puede concluir, por tanto, que cada metro cuadrado de playa se emplea 470 horas al año.

Establecimiento de tasas horarias de ocupación

La tabla que se muestra a continuación refleja las tasas horarias de ocupación previstas para los meses de marzo a octubre.

HORAS	MESES			
	JULIO-AGOSTO	SEPTIEMBRE-JUNIO	ABRIL-MAYO-OCTUBRE	MARZO
10-11	10	5	0	0
11-12	30	20	10	0
12-13	80	70	20	0
13-14	100	90	30	1
14-15	100	90	32	5
15-16	100	90	32	3
16-17	100	90	30	1
17-18	80	60	20	0
18-19	30	20	10	0
19-20	10	5	0	0
	64%	53%	22%	10%

Tabla 3.8. Tasas horarias de ocupación durante los meses de mayor utilización de playa.

Parámetros complementarios

La metodología propuesta es de aplicación local y contempla la inclusión de una serie de parámetros complementarios que responden a las características particulares de cada playa y a sus servicios.

Los parámetros complementarios considerados son los siguientes:

- Factor de tipología de playa:
 - Playas urbanas: 1
 - Playas en áreas de veraneo: 0.66 (sólo en julio y agosto)
 - Playas alejadas de entornos urbanos: 0.33
- Factores de calidad:
 - Acceso: facilidad y seguridad.
 - Servicios complementarios: seguridad y limpieza.
 - Peligrosidad.
 - Calidad ambiental: entorno, arena y contaminación.
 - Orientación.

La distinta combinación de los factores de calidad da lugar a 5 categorías distintas de playas. Estas categorías se muestran en la siguiente tabla:

CATEGORÍA 1	CATEGORÍA 2	CATEGORÍA 3	CATEGORÍA 4	CATEGORÍA 5
Acceso seguro y fácil. Existencia de socorristas, servicio de limpieza y chiringuito. Playa segura y con arena, entorno y calidad de agua buenos. Orientación adecuada.	Acceso seguro y fácil. Existencia de socorristas, servicio de limpieza y chiringuito. Playa segura y con arena, entorno y calidad de agua razonables. Orientación adecuada.	Acceso bastante seguro y fácil. Servicio de limpieza y chiringuito. Playa razonablemente segura y con arena, entorno y calidad de agua aceptables. Orientación adecuada.	Acceso relativamente seguro y fácil. Servicio de limpieza. Playa con nivel de seguridad medio y con arena, entorno y calidad de agua medias. Orientación aceptable.	Acceso difícil y problemático. Carencia de servicios. Playa peligrosa con arena mala y agua contaminada. Mala orientación.
1	0.8	0.5	0.3	0.05

Tabla 3.9. Categorías de calidad de playa.

Valor del tiempo recreativo

Para cuantificar el valor del uso recreativo en playas se dispone de los siguientes datos (OCDE):

- ✓ Horas trabajadas en la economía española: 1699 h/persona y año.
- ✓ Salario medio anual: 26,770 €/ persona y año.
- ✓ Salario medio horario: 15.75 €/persona y hora.

En la literatura científica diversos autores han estudiado el **porcentaje del valor de la hora de ocio respecto a la de trabajo**: desde el 43% establecido por Dodgson y González (1996) al 75% del salario medio, de acuerdo a Dawson y Everall (1972), con un valor intermedio del 60% propuesto por McConnell y Strans (1981), lo que lleva a un rango de variación entre 6.75 y 11.81 €/persona y hora con un valor promedio de 9.45 €/persona y hora.

La normativa de evaluación coste-beneficio de carreteras establece, por otro lado, el valor del tiempo como 7.36 €/vehículo y hora (1990) que se transforman, según poder adquisitivo, en 15.45 €/vehículo y hora. Considerando una ocupación media de 1.8 personas por vehículo se obtiene un valor de 8.6 €/persona y hora, incluyendo viajes por motivo laboral con un coste de tiempo de 15.45 €/persona y hora y, por motivo ocio, con un coste menor.

Finalmente, Riera (1997) establece para el Parque Nacional de Monfrague una valoración del coste de viaje revelada por los usuarios de 4.1 €/persona y hora (1994) lo que, transformado en función del poder adquisitivo, asciende a 6.95 €/persona y hora.

A consecuencia de todo lo anterior, en este estudio se ha aplicado una cifra de **8.5 €/persona y hora**.

Valor económico de la pérdida de superficie de playa seca

En resumen, la valoración de 1 m² de playa seca perdida se puede estimar de la siguiente forma:

- Número de personas por espacio de 1 m²: 0.066 personas/m²
- Horas de utilización de playa: 474.79 horas/persona y año
- Valor del tiempo recreativo: 8.5 €/persona y hora

Por tanto, el valor económico de la pérdida de superficie de playa seca es de **267 €/m² y año**.

Cabe puntualizar que esta valoración es aplicable a playas urbanas, en zonas a situadas a menos de 500 m de la entrada de la playa y en entornos de elevada calidad. Aplicando los factores de reducción propuestos para el caso áreas de veraneo estacional esta cifra descendería a 176 €/m² y año y, para el caso de playas con calidad media, se reduciría a 88 €/m² y año.

Valoración contable

En el análisis anterior se ha calculado la valoración del flujo de servicios que proporciona la playa.

Asumiendo:

- Renta perpetua constante
- Tasa de descuento del 4% a medio plazo

Se puede obtener el valor en €/m² de la superficie de playa seca perdida para cada tipología de playa y en función del índice de calidad. Los ratios obtenidos se muestran en la Tabla 3.10.

TIPO DE PLAYA	ÍNDICE DE CALIDAD				
	1	0.8	0.5	0.2	0.02
Playa urbana	6675 €/m ²	5340 €/m ²	3337.5 €/m ²	1335 €/m ²	133.5 €/m ²
Playa veraneo	4400 €/m ²	3520 €/m ²	2200 €/m ²	880 €/m ²	88 €/m ²
Playa alejada	2200 €/m ²	1760 €/m ²	1100 €/m ²	440 €/m ²	44 €/m ²

Tabla 3.10. Valor contable de la superficie de playa seca en función del tipo de playa y su índice de calidad.

Finalmente, como aproximación y para tener en cuenta que los usuarios tienden a colocarse en un radio inferior a los 500 metros respecto a los accesos, se ha aplicado un coeficiente corrector en función de la longitud de playa. Para ello, se ha asumido que existe un único acceso principal ubicado en el centro de la playa y que es utilizado por la mayoría de usuarios.

LONGITUD DE PLAYA (m)	COEFICIENTE REDUCTOR
L < 1000	1
1000 < L < 2000	0.75
2000 < L < 3000	0.6
L > 3000	0.5

Tabla 3.11. Coeficiente reductor por longitud de playa.

3.3.2.4. Limitaciones

La metodología propuesta tiene una serie de limitaciones asociadas al modelado de la erosión, al proceso de evaluación del valor de uso recreativo de playa y a la relación causa-efecto entre la pérdida de uso recreativo y la pérdida de turismo.

El análisis de la erosión se ha llevado a cabo mediante la aplicación de la 'Regla de Bruun', que establece que el ascenso del nivel medio del mar provoca el retroceso del perfil de playa. El modelo asume numerosas hipótesis simplificadoras como suponer

todas las playas encajadas, el tamaño del grano homogéneo en cada una de ellas, la altura de berma constante y la conservación del sedimento en el sistema.

Por otro lado, el procedimiento de evaluación del valor del uso recreativo de las playas está sujeto a una gran variabilidad. Son muchas las hipótesis asumidas y también los parámetros complementarios que intervienen. Para un análisis detallado sería necesario hacer un trabajo de campo que permitiese calibrar todas las partes del proceso, lo cual excede el alcance de este estudio.

Finalmente cabe puntualizar que, pese a que se tiene certeza de que la pérdida de superficie de playa seca y, por consiguiente, de su uso recreativo tiene como consecuencia directa una disminución del turismo, no se dispone actualmente de una relación empírica cuantificable. No obstante, lo que se pretende es emplear el valor de uso recreativo como indicador de la susceptibilidad de las playas asturianas frente a la erosión y estimar la dimensión del problema que conllevaría su pérdida sobre el sistema socioeconómico actual.

3.4. Resultados

A lo largo de este apartado, se presentan las consecuencias sociales y económicas a las que se podría llegar, en cada concejo y para los distintos escenarios de riesgo propuestos, sujetas a las siguientes consideraciones:

- No se está realizando una previsión o pronóstico de daños que aspire a ser certero, es decir a prever lo que realmente va a ocurrir, sino más bien un ejercicio de ensayo en el que se presenta lo que podría observarse en un territorio teórico que resultaría de una evolución del espacio socioeconómico de estudio ante escenarios climáticos. Este ensayo pretende ser representativo de posibles evoluciones de la sociedad afectada, mostrando la variación de las consecuencias que se podrían percibir para así poder mostrar cómo podrían contribuir las estrategias de adaptación con las que cuenta la sociedad y evaluar su posible aportación al bienestar social.
- Se ha realizado una estimación del crecimiento tendencial mínimo del territorio y su incidencia diferencial en las áreas costeras y se ha prorrogado su actuación durante un siglo, con unos crecimientos tendenciales aproximados a los mínimos observados durante los últimos años. Como resultado se ha ensayado el impacto bioclimático de una sociedad que hubiera continuado realizando, sin límite, las decisiones de elección espacial que se han observado en los últimos 30 años, atrayendo hacia la costa la actividad humana de forma masiva. Esta estrategia está lejos de ser la más plausible dado que es de suponer que los frenos al crecimiento costero localizado se activen, bien por saturación de capacidad o bien por aprendizaje y maduración de la sociedad.
- Se ha obviado la estimación de estrategias económico-espaciales futuras cuya caracterización sería objeto de fuertes controversias y que quedaría fuera del alcance de este estudio, que es el de proporcionar una estimación de los daños evitados por el eventual menú de medidas de protección que sean consideradas, alimentando una discusión que no se debe centrar en el impacto del cambio climático bruto, sino en las medidas correctoras con que nuestra sociedad cuenta.

Se presenta, además, la identificación de infraestructuras críticas afectadas para los escenarios climáticos planteados en este estudio.

3.4.1. Riesgo sobre la población

Las figuras 3.29-3.37 muestran los resultados de población expuesta a inundación bajo las hipótesis de los distintos escenarios de riesgo propuestos, expresados en términos de porcentaje respecto al total de población de cada concejo, referido al censo de 2010.

Es importante señalar que los resultados que se presentan a continuación son indicadores de la susceptibilidad actual de la población ya que, a partir de un cierto aumento del nivel medio del mar, se produciría una reubicación de asentamientos urbanos en riesgo.

La figura 3.29 muestra la población afectada para el escenario representativo del evento de 100 años de retorno en el clima actual. Muros de Nalón alcanza el 8,3% de la población afectada seguido de Soto del Barco y Ribadesella con 8% y 7%, respectivamente. Los concejos de El Franco, Caravia y Gijón son los menos afectados.

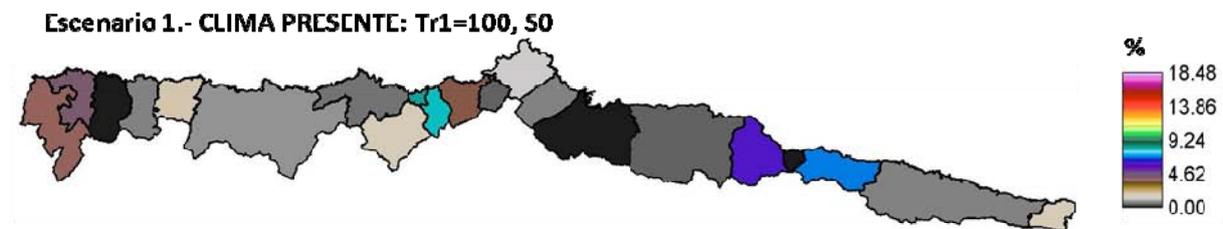


Figura 3.29. Población afectada para E1: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el clima actual considerando la población presente.

La siguiente figura representa las consecuencias sociales asociadas al evento de 500 años de periodo de retorno en el clima presente. En este caso, Ribadesella supera el 9.5% de población afectada. El Franco, Caravia y Gijón continúan siendo los concejos con menor porcentaje de población afectada.

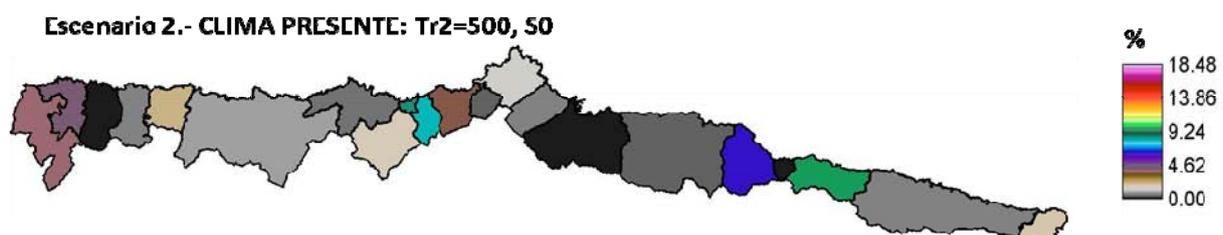


Figura 3.30. Población afectada para E2: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno en el clima actual considerando la población presente.

La figura 3.31 muestra los porcentajes de población afectada en base a las hipótesis asumidas en el escenario 3, que tiene en cuenta el evento extremo de 100 años de periodo de retorno y un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050. Se han aplicado las proyecciones oficiales de población elaboradas por el gobierno del Principado de Asturias. Ribadesella alcanza el 12.5% de población afectada y los concejos de Muros de Nalón y Soto del Barco se mantienen en el entorno del 9% y del 8%,

respectivamente. Debido al aumento del nivel medio del mar, Navia aumenta la población afectada del 2% al 3.5%.

Escenario 3.- HORIZONTE= 2050: Tr1=100 + SLR1= 0.24 m, S1

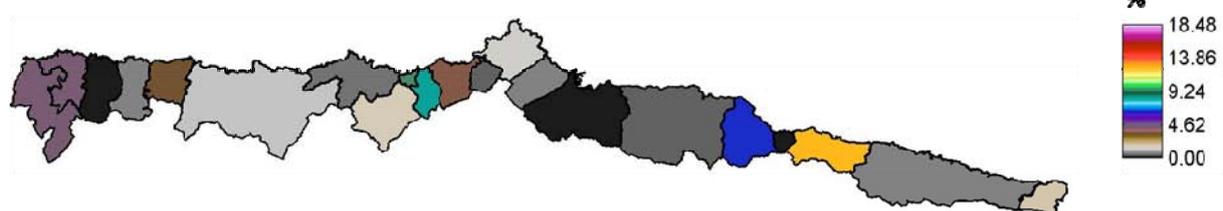


Figura 3.31. Población afectada para E3: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050 considerando las proyecciones oficiales de población.

La figura 3.32 representa la población afectada, por concejo, para el escenario asociado al evento extremo de 500 años de periodo y un aumento de nivel de 0.24 m a medio plazo. Se han aplicado las proyecciones oficiales de población elaboradas por el gobierno del Principado de Asturias. Ribadesella sigue siendo el concejo más afectado en porcentaje de población respecto al total del concejo, alcanzando el 14%.

Escenario 4.- HORIZONTE= 2050: Tr1=500 + SLR1= 0.24 m, S1

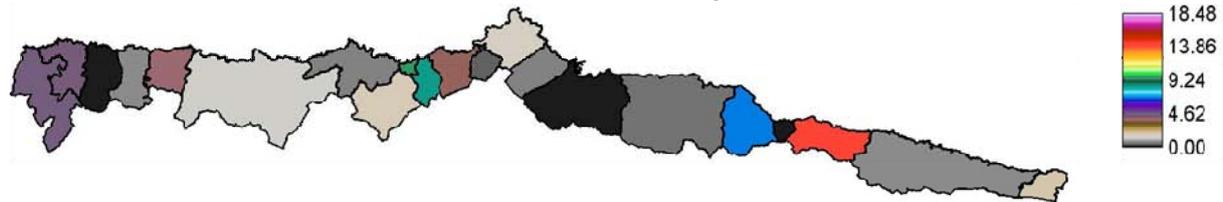


Figura 3.32. Población afectada para E4: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050 considerando las proyecciones oficiales de población.

Los resultados obtenidos para el escenario de inundación permanente debido a un aumento del nivel medio del mar de 1 m se muestran en la siguiente figura (véase la figura 3.32). Se ha asumido la población actual. Los concejos más afectados son Soto del Barco y Muros de Nalón con el 7.4% y el 7.2% de población afectada, respectivamente, seguidos de Ribadesella con un 5.5% y Colunga con un 4.5%.

Escenario 5.- HORIZONTE- 2100: SLR4- 1 m, S2



Figura 3.33. Población afectada para E5: Inundación permanente por aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100 considerando la población del presente.

La figura 3.34 muestra las consecuencias sobre la población derivadas del escenario 6, que combina la inundación por el evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio en la costa asturiana modificado localmente), considerando la población actual. El concejo que experimenta un mayor aumento de daño social es Navia, que alcanza casi el 6% de la población afectada.

Ribadesella supera el 15% de población afectada. Por otro lado, El Franco, Caravia y Gijón continúan siendo los concejos con menores consecuencias sociales.

Escenario 6.- HORIZONTE= 2100: Tr1=100 + SLR2= 0.45 m, S2

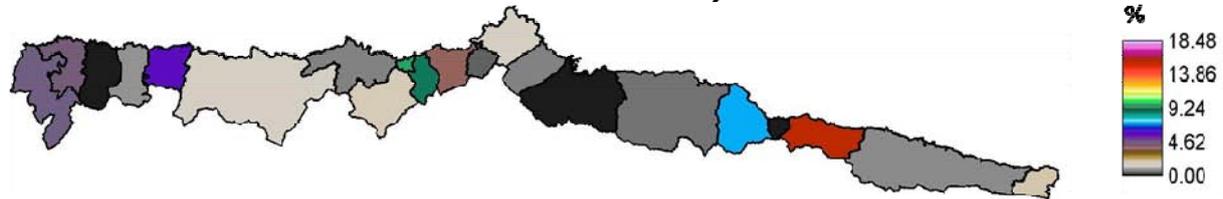


Figura 3.34. Población afectada para E6: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 considerando la población del presente.

La siguiente figura recoge los daños sobre la población asociados al evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio en la costa asturiana modificado localmente), considerando la población del presente. Los concejos que alcanzan mayores porcentajes de población afectada son Ribadesella con un 16.5%, Muros de Nalón con un 10%, Soto del Barco con un 9%, Colunga con un 7.6% y Navia con un 7%.

Escenario 7.- HORIZONTE= 2100: Tr2=500 + SLR2= 0.45 m, S2

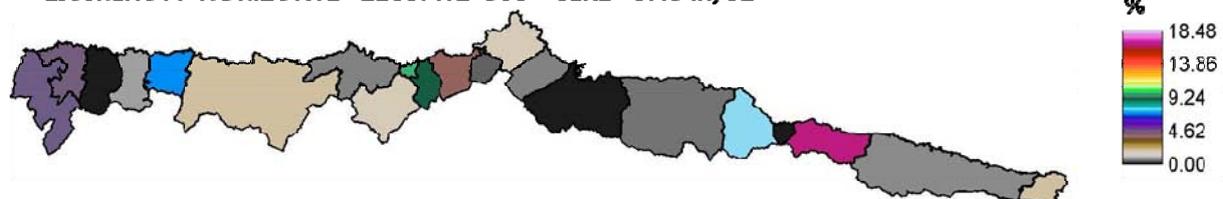


Figura 3.35. Población afectada para E7: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 considerando la población del presente.

La figura 3.36 representa la población afectada para el escenario 8, que combina los efectos de un evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio en la costa asturiana modificado localmente) y que considera la población del presente. Ribadesella, Muros de Nalón, Navia y Soto del barco alcanzan, respectivamente, los porcentajes de 17.3%, 10%, 9.6% y 9.5%, seguidos de Colunga con prácticamente el 8%.

Escenario 8.- HORIZONTE= 2100: Tr1=100 + SLR3= 0.65 m, S2



Figura 3.36. Población afectada para E8: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 considerando la población del presente.

La siguiente figura muestra las consecuencias sociales derivadas del escenario 9, que combina el evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento de nivel de 0.65 a 2100 (valor medio en la costa asturiana modificado localmente), considerando las características de la población actual. Ribadesella alcanza un porcentaje de población

afectada del 18.48%, respecto a la población del concejo. Los concejos de Muros de Nalón, Navia y Soto del Barco obtienen porcentajes del entorno del 10.2%. Los concejos con menos de un 1% de población afectada son El Franco y Caravia, seguidos de Gijón, Avilés, Carreño, Cudillero y Llanes, con porcentajes que oscilan en un rango de 0.15% a 0.7%.

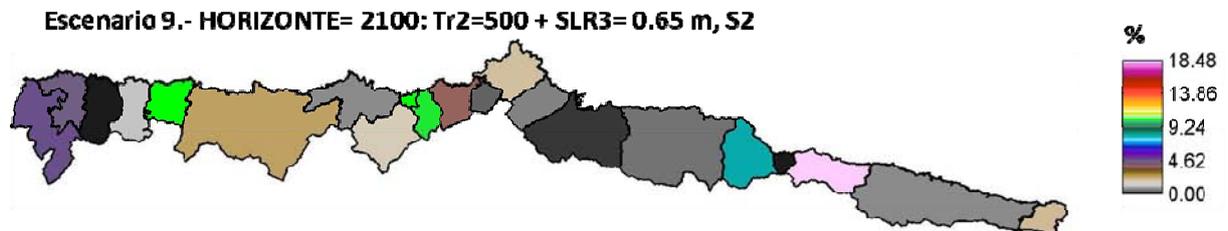


Figura 3.37. E9: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 considerando la población del presente.

La figura 3.38 muestra un gráfico de barras con el porcentaje de población afectada para cada escenario de riesgo propuesto, respecto a la población total de la provincia. Se puede observar cómo, para los escenarios que combinan eventos extremos con aumentos del nivel medio del mar de 0.45 y 0.65 m a 2100 (valores medios en la costa asturiana modificados localmente), se supera el 1% de la población afectada.

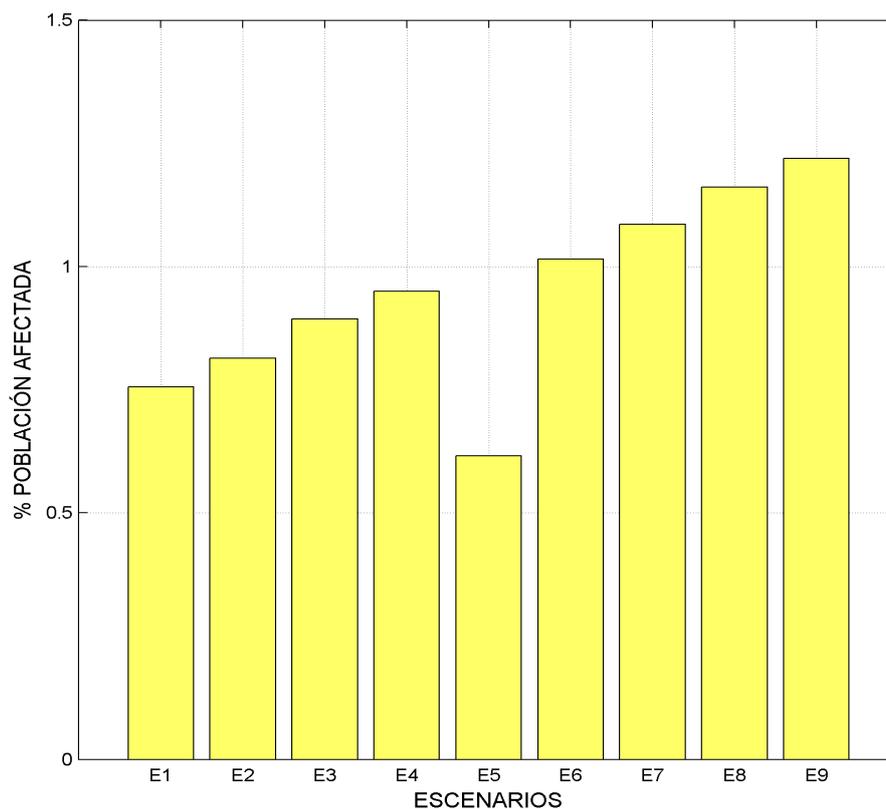


Figura 3.38. Porcentaje de población afectada en cada escenario, respecto al total de Asturias.

La figura 3.39 muestra dos gráficos de barras que comparan el porcentaje de población afectada respecto al total de cada concejo. Los concejos con mayor proporción de población expuesta son Ribadesella, Muros de Nalón, Soto del Barco, Navia y Colunga.

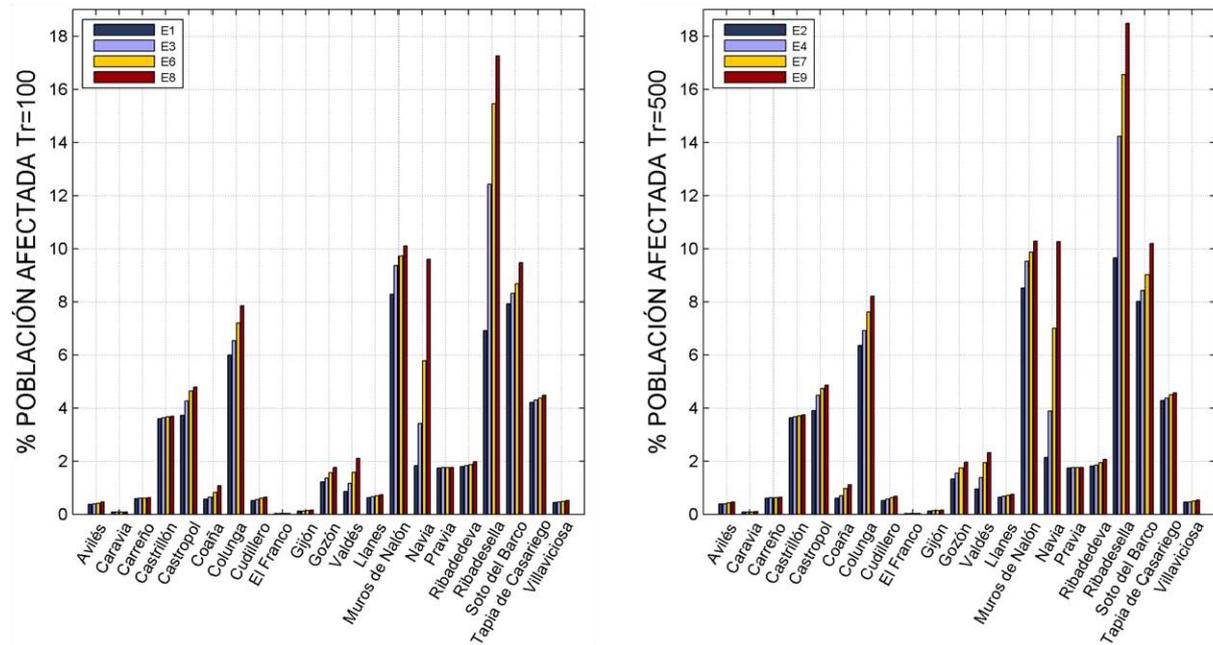


Figura 3.39. Porcentaje de población afectada respecto al total de cada concejo: escenarios 1, 3, 6 y 8 (panel izquierdo) y escenarios 2, 3, 6 y 8 (panel derecho)

Para apreciar con mayor claridad las diferencias entre los porcentajes de población afectada en los escenarios asociados al cuantil de 100 años de periodo de retorno y los asociados al de 500 años de periodos de retorno se muestra el gráfico de barras de la figura 3.40. El rango de disimilitud oscila, en función del escenario y concejo, entre prácticamente 0% y 2.8%, observándose las mayores discrepancias en Ribadesella para los escenarios representativos del clima presente y de las consecuencias a medio plazo.

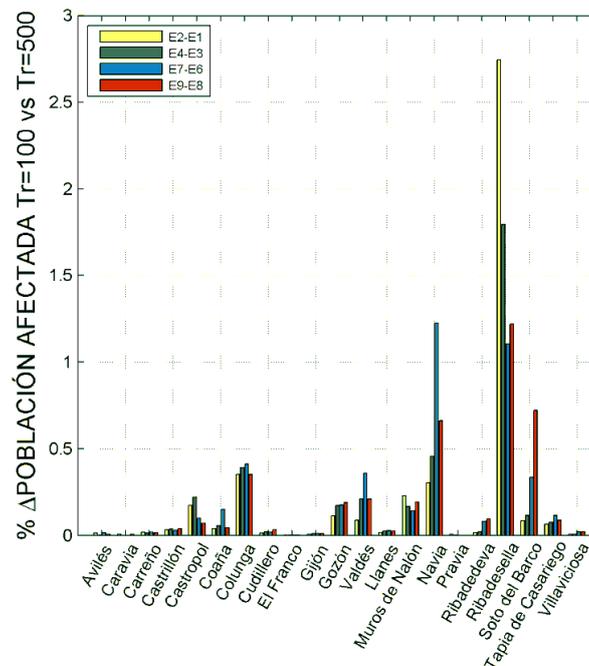


Figura 3.40. Diferencia en el porcentaje de población afectada para los escenarios asociados al cuantil de 100 y 500 años de periodo de retorno.

3.4.2. Riesgo sobre el sistema económico

Dado que las proyecciones de los distintos indicadores económicos se han llevado a cabo en base a crecimientos tendenciales, se ha considerado oportuno, además de mostrar los resultados obtenidos para cada escenario de riesgo planteado, presentar los derivados de los escenarios climáticos, es decir, sin tener en cuenta cambios en las variables económicas. Por otro lado, y tal y como se ha expuesto anteriormente en este documento, si se desean evaluar las consecuencias de un evento aislado para las generaciones futuras que lo van a sufrir, éstas se deben presentar sin descontar, aunque sí medidas en unidades monetarias constantes del presente a fin de escalarlo a la realidad actual. En cambio, para contabilizar los daños en ausencia de medidas de adaptación, o el total de activos en riesgo, se debe calcular la suma descontada para comparar resultados en distintos momentos y, sin descontar, si sólo se pretende representar un evento, en ambos casos en unidades monetarias constantes del presente. Estos criterios, no obstante, pueden causar alguna ambigüedad en función del uso que se desee dar a los resultados. Por ello, se ha decidido presentar los resultados descontados aparte. De este modo y con el objetivo de proporcionar una visión acerca de la sensibilidad de los resultados a los distintos procesos que engloba la evaluación económica de las consecuencias, éstas se presentan de forma independiente como respuesta a escenarios climáticos, a escenarios de riesgo sin descontar y a escenarios de riesgo descontados.

Cabe recalcar, una vez más, que las cifras que se presentan a continuación no constituyen un pronóstico de daños sino que son indicadores de las consecuencias a las que se podría llegar en caso de no actuar, ya que no contemplan procesos de adaptación ni de aprendizaje por parte de la población.

3.4.2.1 Stock de capital

En este apartado se muestran las consecuencias sobre el stock de capital de vivienda (continente y contenido) e industrial bajo distintas hipótesis. A nivel general, cabe destacar la importancia de la implementación de curvas de daño, en el caso de escenarios asociados a inundación por eventos extremos, para no sobrestimar las consecuencias, pues el porcentaje de stock afectado se reduce considerablemente.

En primer lugar, se presentan los resultados derivados de los escenarios climáticos, que sólo tienen en cuenta cambios en las variables climáticas.

La distribución espacial de las consecuencias sobre el stock de capital de vivienda - continente se presenta en las figuras 3.41-3.49. Los resultados muestran porcentajes de stock de capital de vivienda - continente afectado, por concejo, respecto al stock de capital de vivienda total de toda la provincia, que asciende a 26 223 845 402 EUR (en euros constantes de 2006, Fundación BBVA). Se puede observar cómo Ribadesella es el concejo que sufrirá los mayores daños, pudiendo alcanzar a fin de siglo un daño efectivo en torno al 0.03% (véase la figura 3.49). Actualmente, ante eventos extremos de inundación, se aprecian daños efectivos sobre los inmuebles de Gozón por valor del 0.003% del stock de capital de vivienda provincial. Los concejos que sufren menores consecuencias, sin embargo, son El Franco, Coaña, Castrillón y Carreño. Por otro lado, y en lo que respecta al escenario de inundación permanente (véase la figura 3.45), sólo se

observan daños significativos en Navia, debido a la gran extensión de zonas bajas próximas a las márgenes de la ría.

Escenario 1.- CLIMA PRESENTE: Tr1=100, S0



Figura 3.41. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E1: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el clima actual. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

Escenario 2.- CLIMA PRESENTE: Tr2=500, S0



Figura 3.42. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E2: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno en el clima actual. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

Escenario 3.- HORIZONTE= 2050: Tr1=100 + SLR1= 0.24 m, S0



Figura 3.43. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E3: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, sin considerar cambios en las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

Escenario 4.- HORIZONTE= 2050: Tr1=500 + SLR1= 0.24 m, S0



Figura 3.44. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E4: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, sin considerar cambios en las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

Escenario 5.- HORIZONTE= 2100: SLR4= 1 m, S0



Figura 3.45. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E5: Inundación permanente por aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100, sin considerar cambios en las variables socioeconómicas. El daño producido es máximo.

Escenario 6.- HORIZONTE= 2100: Tr1=100 + SLR2= 0.45 m, S0



Figura 3.46. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E6: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio modificado localmente), sin consdierar cambios en las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

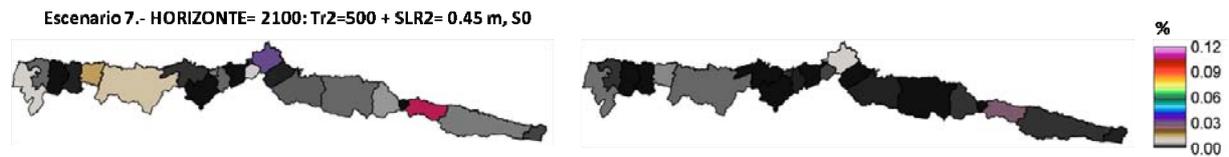


Figura 3.47. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E7: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio modificado localmente), sin considerar cambios en las variables socioeconómicas, sin consierar cambios en las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

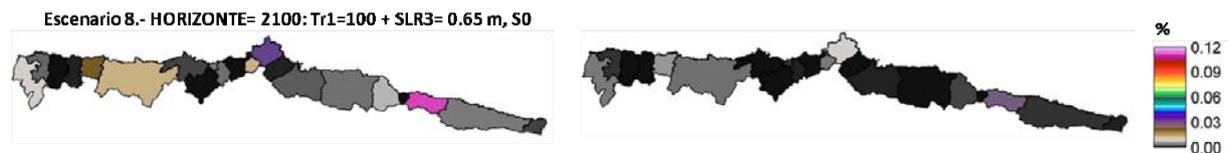


Figura 3.48. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E8: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio modificado localmente), sin considerar cambios en las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

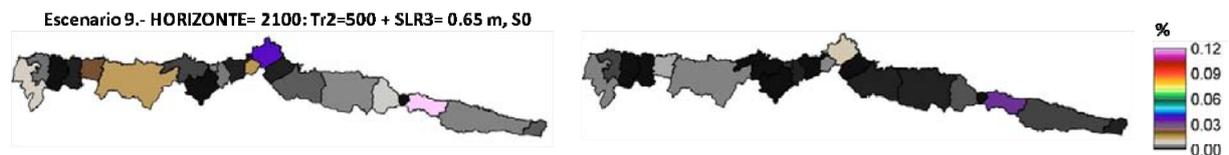


Figura 3.49. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E9: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio modificado localmente), sin considerar cambios en las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

La siguiente figura muestra dos gráficos de barras que describen, de manera independiente, los porcentajes del stock de capital de vivienda - continente afectado para los escenarios de inundación asociados a los cuantiles de 100 y 500 años de periodo de retorno (paneles izquierdo y derecho, respectivamente), sin tener en cuenta las proyecciones de los indicadores económicos. Tal y como se ha podido observar en los gráficos anteriores, Ribadesella y Gozón son los dos concejos más afectados, seguidos de Navia, Avilés y Castropol, éste último con consecuencias notables ante los escenarios más pesimistas.

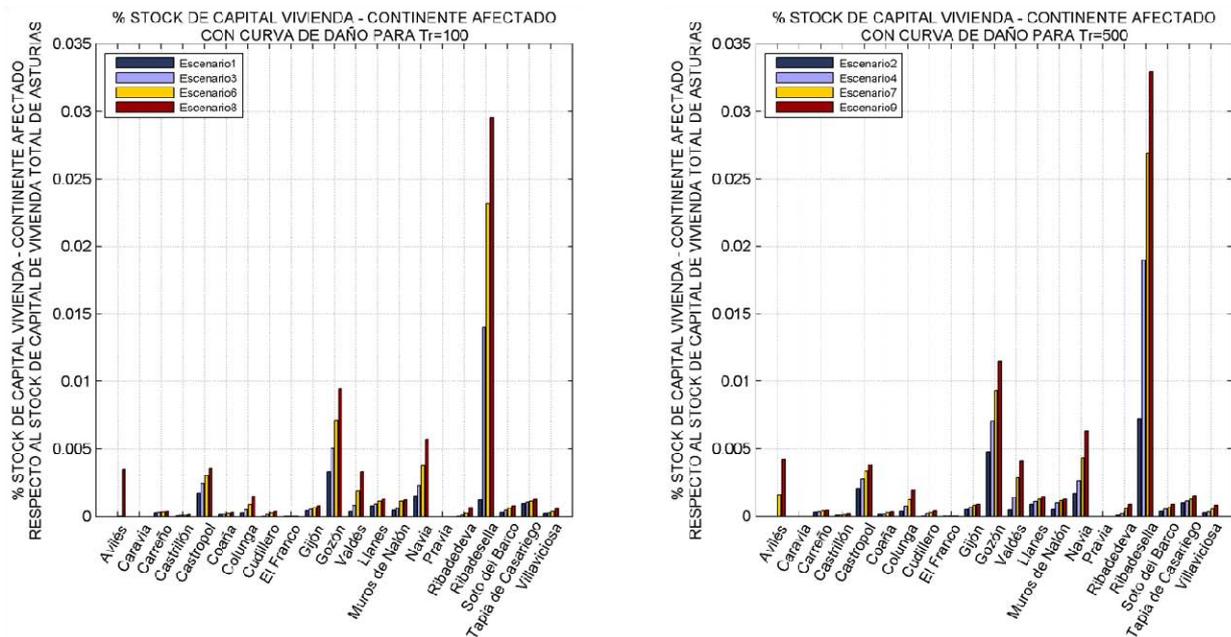


Figura 3.50. Porcentaje de stock de capital de vivienda - continente afectado respecto al stock de capital de vivienda total de Asturias: escenarios 1, 3, 6 y 8 (panel izquierdo) y escenarios 2, 4, 7 y 9 (panel derecho), sin considerar cambios en las variables socioeconómicas. Los daños que se muestran son efectivos.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el contenido del stock de capital de vivienda. Se muestran porcentajes respecto al stock de capital de vivienda agregado a toda la provincia.

De acuerdo a lo que se puede apreciar en las figuras 3.51-3.59, las consecuencias sobre el contenido del stock de capital de vivienda siguen el mismo patrón que las expuestas en el caso del continente, especialmente previa aplicación de las curvas de daño pues éstas son distintas en cada caso. Esto se debe a que, habiendo empleado el mismo procedimiento para calcular los daños, se ha asumido que el valor del contenido de las viviendas de Asturias asciende a un tercio del valor del stock de capital de vivienda de la provincia, tal y como se ha explicado en el apartado 3.3.1.3 de este documento.



Figura 3.51. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E1: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el clima actual. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.52. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E2: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno en el clima actual. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

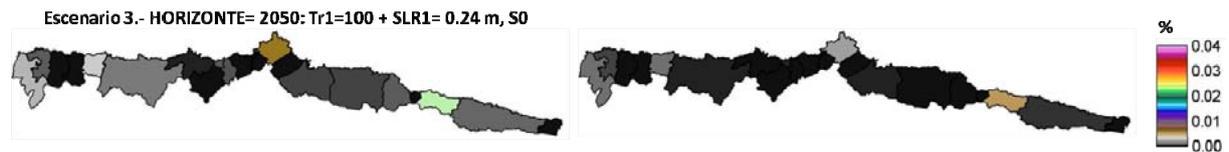


Figura 3.53. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E3: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, sin considerar cambios en las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

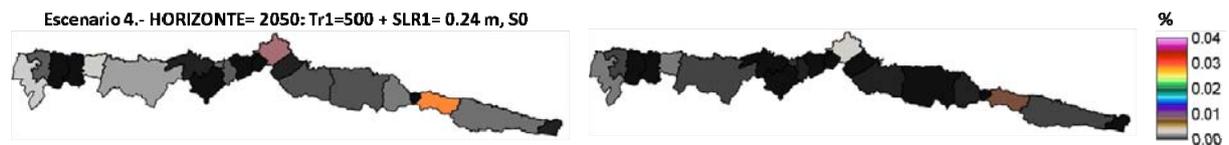


Figura 3.54. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E4: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, sin considerar cambios en las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.55. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E5: Inundación permanente por aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100, sin considerar cambios en las variables socioeconómicas. El daño producido es máximo.

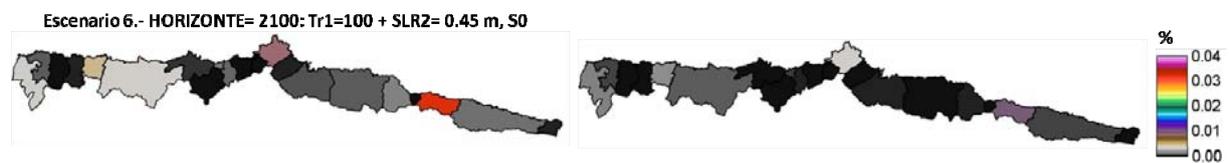


Figura 3.56. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E6: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio modificado localmente), sin considerar cambios en las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

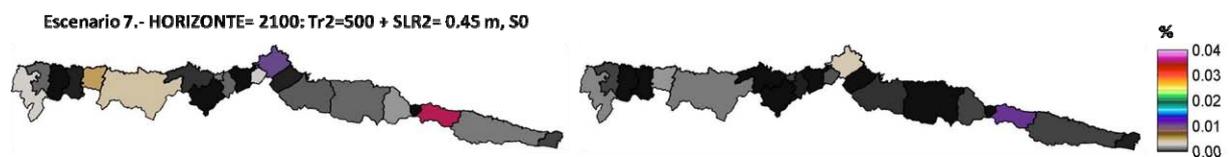


Figura 3.57. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E7: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio modificado localmente), sin considerar cambios en las variables socioeconómicas, sin consierar cambios en las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.58. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E8: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio modificado localmente), sin considerar cambios en las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

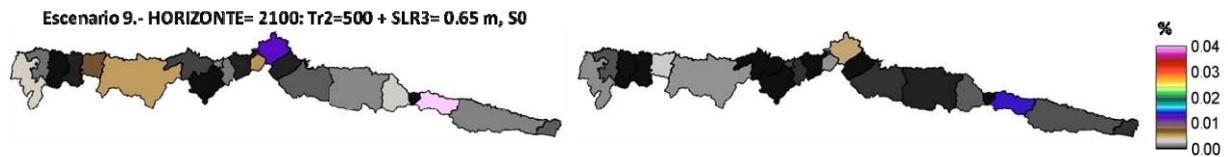


Figura 3.59. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E9: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio modificado localmente), sin considerar cambios en las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

La figura 3.60 muestra, para cada grupo de escenarios asociados a los distintos cuantiles de periodo de retorno considerados, los daños sobre el stock de capital de vivienda - contenido sin considerar cambios en los indicadores económicos.

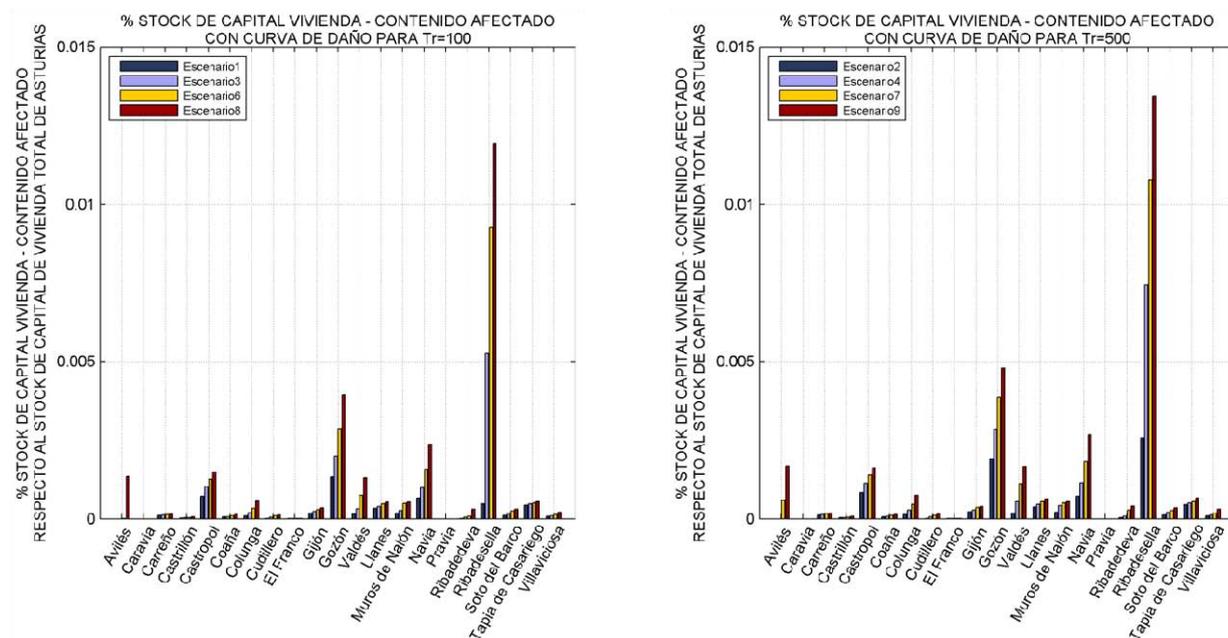


Figura 3.60. Porcentaje de stock de capital de vivienda - contenido afectado respecto al stock de capital de vivienda total de Asturias: escenarios 1, 3, 6 y 8 (panel izquierdo) y escenarios 2, 4, 7 y 9 (panel derecho), sin considerar cambios en las variables socioeconómicas. Los daños que se muestran son efectivos.

Las figuras 3.61-3.69 presentan las consecuencias sobre el stock de capital industrial. Los resultados que se muestran están expresados en porcentaje de stock industrial afectado en cada concejo respecto al stock de capital industrial total del Principado de Asturias, que asciende a 13 980 373 021 EUR (en euros constantes de 2006, Fundación BBVA), sólo teniendo en cuenta cambios en las variables climáticas. Se puede observar cómo Valdés experimentará daños efectivos por cuantía equivalente al 0.01% del stock industrial provincial en cada uno de los escenarios ensayados. Por otro lado, los concejos más afectados son Avilés, que sufrirá daños efectivos por valor del 0.32% del stock de capital industrial asturiano a final de siglo si no se actúa al respecto, y Navia, cuyo porcentaje de afección efectiva ascenderá al 0.02% (véase la figura 3.69).



Figura 3.61. Stock de capital industrial afectado para E1: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el clima actual. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

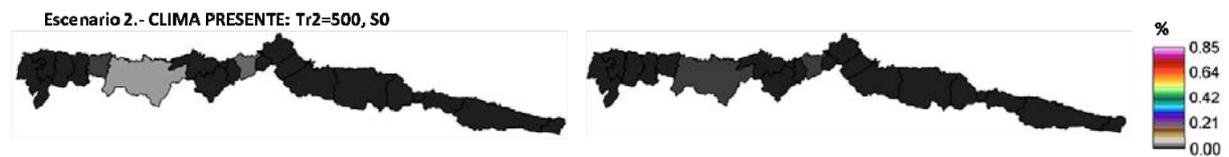


Figura 3.62. Stock de capital industrial afectado para E2: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno en el clima actual. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.63. Stock de capital industrial afectado para E3: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, sin considerar cambios en las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.64. Stock de capital industrial afectado para E4: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, sin considerar cambios en las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.65. Stock de capital industrial afectado para E5: Inundación permanente por aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100, sin considerar cambios en las variables socioeconómicas. El daño producido es máximo.



Figura 3.66. Stock de capital industrial afectado para E6: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio modificado localmente), sin considerar cambios en las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.67. Stock de capital industrial afectado para E7: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio modificado localmente), sin considerar cambios en las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.68. Stock de capital industrial afectado para E8: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio modificado localmente), sin considerar cambios en las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

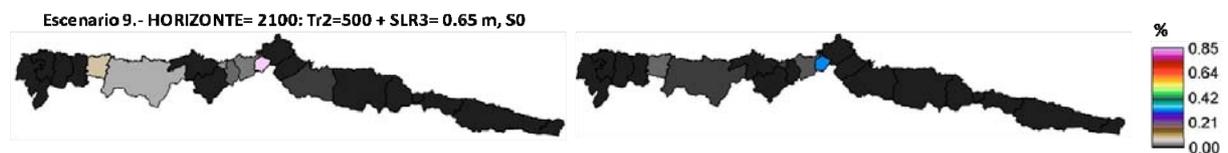


Figura 3.69. Stock de capital industrial afectado para E9: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio modificado localmente), sin considerar cambios en las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

Análogamente al stock de capital de vivienda afectado, la figura 3.70 muestra dos gráficos de barras con el porcentaje de daño sobre el stock de capital industrial en cada concejo, sin tener en cuenta cambios en los indicadores socioeconómicos. Los escenarios asociados a los eventos de 100 y 500 años de periodo de retorno se han tratado de forma independiente. Se puede apreciar que Avilés alcanzará el mayor grado de afección en todo el litoral asturiano.

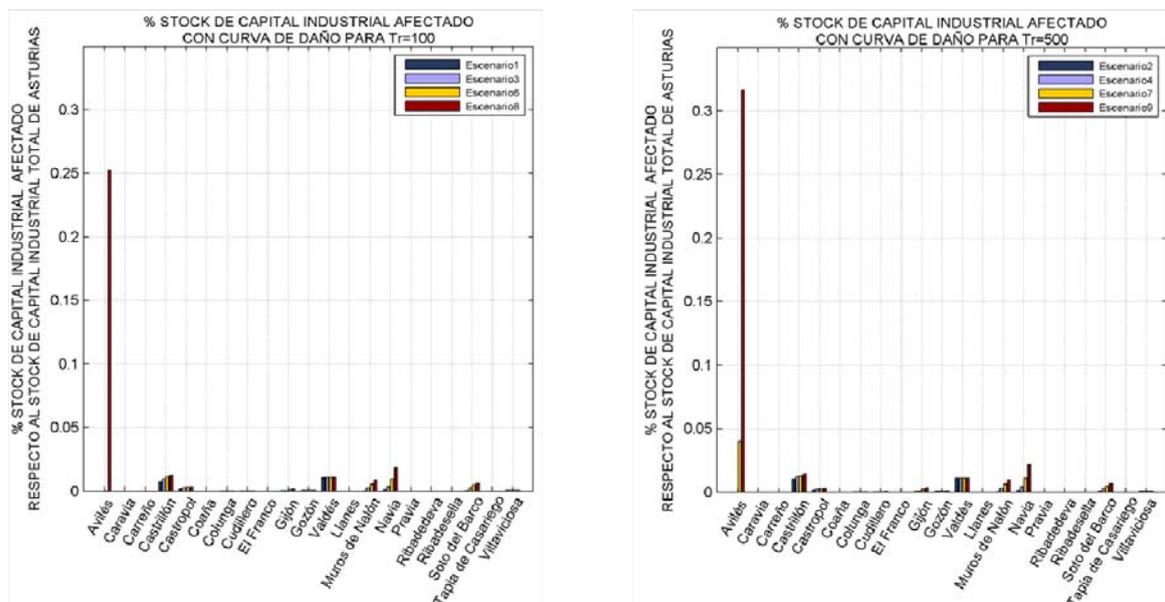


Figura 3.70. Porcentaje de stock de capital industrial afectado respecto al stock de capital industrial total de Asturias: escenarios 1, 3, 6 y 8 (panel izquierdo) y escenarios 2, 4, 7 y 9 (panel derecho), sin considerar cambios en las variables socioeconómicas. Los daños que se muestran son efectivos.

La figura 3.71 muestra el stock de capital de vivienda e industrial afectado para cada escenario considerado. En general, se puede observar cómo el porcentaje de stock de capital industrial afectado se mantiene ligeramente por encima del de vivienda hasta que, tras una subida del nivel de en torno a 0.65 m (escenarios 8 y 9), sufrirá un brusco aumento. Este incremento se deberá, principalmente, a las consecuencias derivadas de desbordamientos en la ría de Avilés.

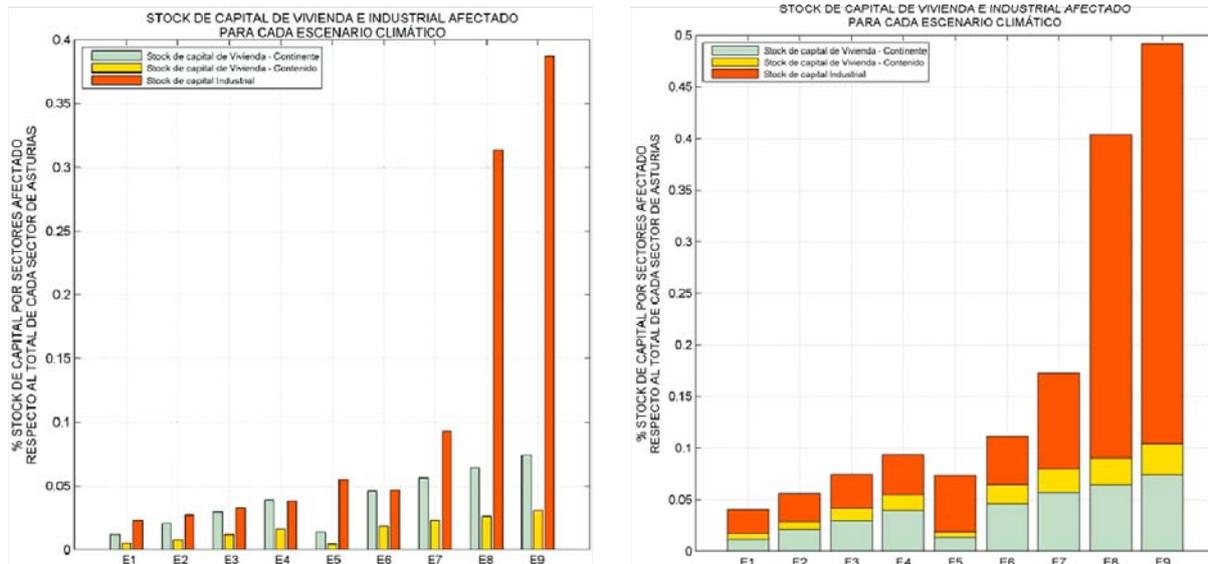


Figura 3.71. Porcentaje de stock de capital afectado por sectores respecto al total de stock de capital agregado a nivel provincial de cada sector, sin considerar cambios en las variables socioeconómicas.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los escenarios de riesgo sin descontar, es decir, escenarios que además de contemplar cambios en el clima, tienen en cuenta las proyecciones de los distintos indicadores socioeconómicos a los horizontes temporales establecidos, pero a los que no se les ha implementado ninguna tasa de descuento.

Las figuras 3.72-3.84 muestran la distribución espacial de las consecuencias sobre el continente del stock de capital de vivienda. Los resultados están expresados en porcentaje de stock de vivienda - continente afectado respecto al stock de capital de vivienda total del Principado de Asturias. Dado que los datos de stock de los que se dispone están agregados a nivel provincial, la tasa de crecimiento aplicada es homogénea para todo el territorio y asciende al 1.946% anual. Se puede observar, por este motivo, que la tendencia que sigue la evolución de las consecuencias a lo largo de los distintos escenarios es la misma que en caso de considerar únicamente cambios en el clima, no obstante, alcanzando mayores porcentajes de afección.



Figura 3.72. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E1: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el clima actual. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.73. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E2: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno en el clima actual. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.74. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E3: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.75. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E4: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.76. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E5: Inundación permanente por aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100, considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas. El daño producido es máximo.

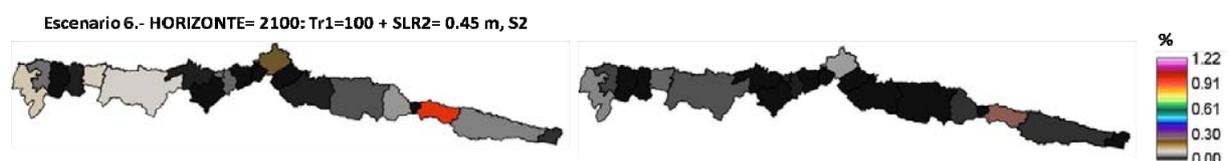


Figura 3.77. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E6: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio modificado localmente), considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

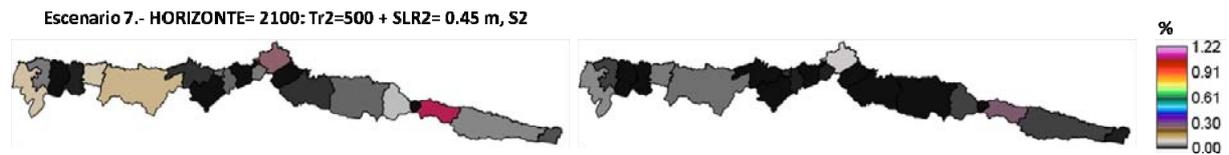


Figura 3.78. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E7: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 2100 (valor medio modificado localmente), considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

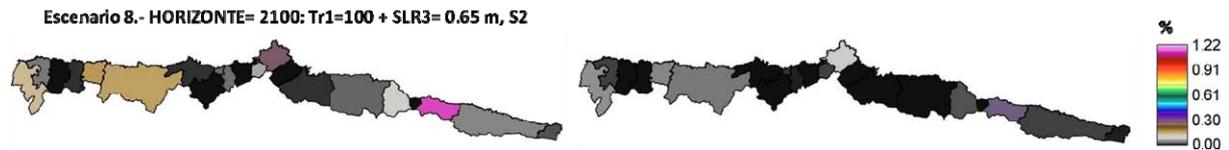


Figura 3.79. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E8: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 2100 (valor medio modificado localmente), considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

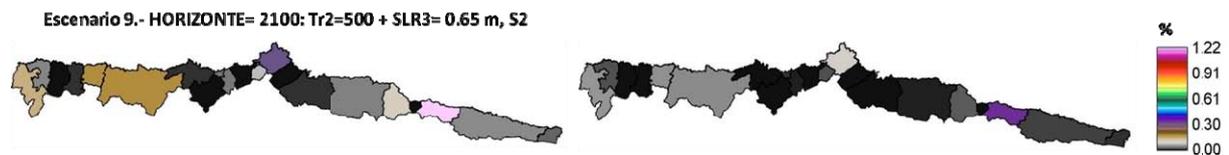


Figura 3.80. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E9: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 2100 (valor medio modificado localmente), considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

La figura 3.81 muestra los porcentajes del stock de capital de vivienda - continente afectado derivados de los distintos escenarios de riesgo considerados, asociados a los cuantiles de 100 y 500 años de periodos de retorno.

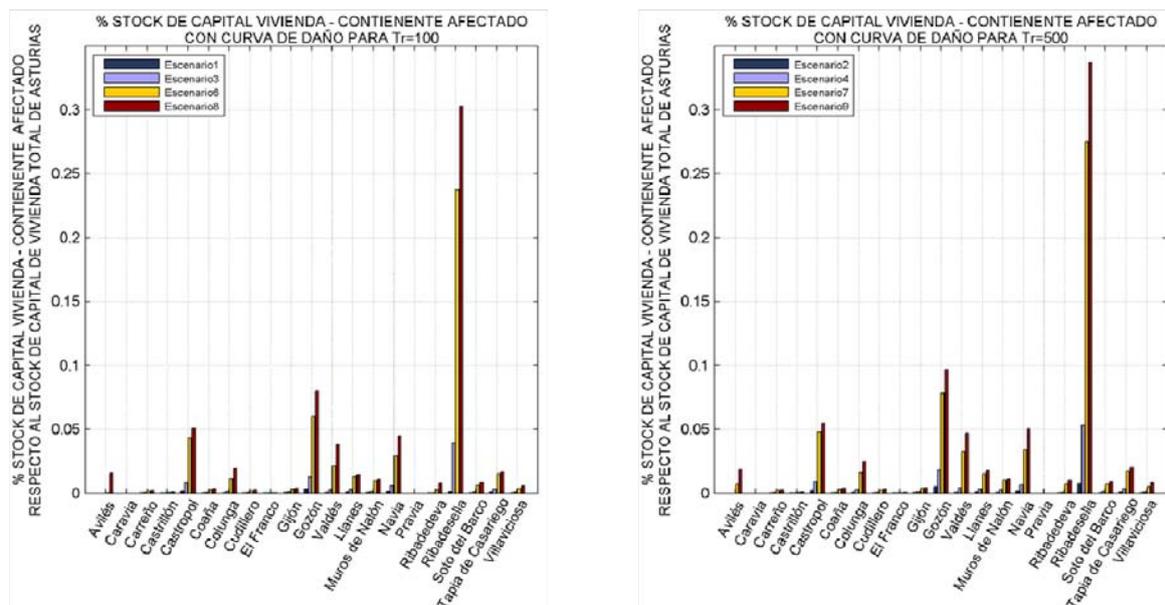


Figura 3.81. Porcentaje de stock de capital de vivienda - continente afectado respecto al stock de capital de vivienda total de Asturias: escenarios 1, 3, 6 y 8 (panel izquierdo) y escenarios 2, 4, 7 y 9 (panel derecho), considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas. Los daños que se muestran son efectivos.

Las figuras 3.82-3.90 muestran la distribución espacial del stock de capital de vivienda - contenido afectado que responde a las consecuencias derivadas de los escenarios de riesgo considerados. La tasa anual de crecimiento es la misma que la aplicada en el caso del continente del stock de capital de vivienda y ha sido, de igual modo, implementada de manera homogénea en todos los concejos del litoral asturiano. Los resultados siguen el mismo patrón pero, en este caso, el daño efectivo alcanzado en Ribadesella (concejo con mayor afección sobre el stock de capital de vivienda) ascenderá al 0.14% del valor de las viviendas de Asturias para el evento extremo de 500 años de periodo con el nivel medio del mar de 64 cm.



Figura 3.82. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E1: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el clima actual. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.83. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E2: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno en el clima actual. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.84. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E3: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.85. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E4: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.86. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E5: Inundación permanente por aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100, considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas. El daño producido es máximo.

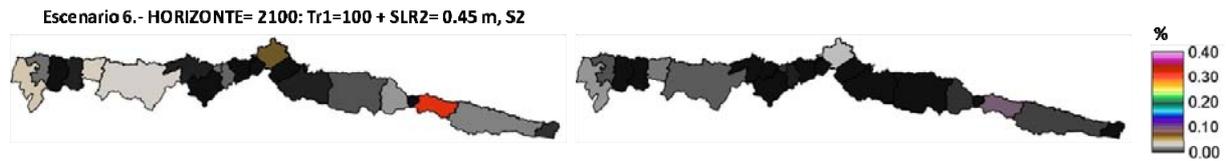


Figura 3.87. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E6: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 2100 (valor medio modificado localmente), considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

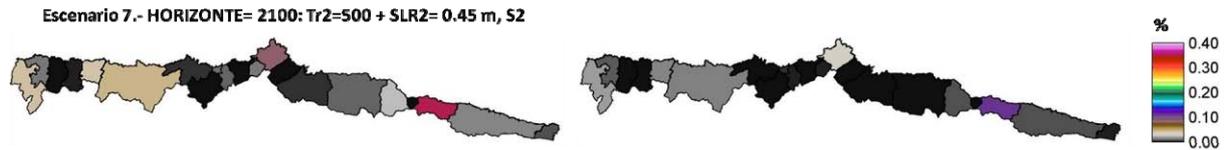


Figura 3.88. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E7: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 2100 (valor medio modificado localmente), considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

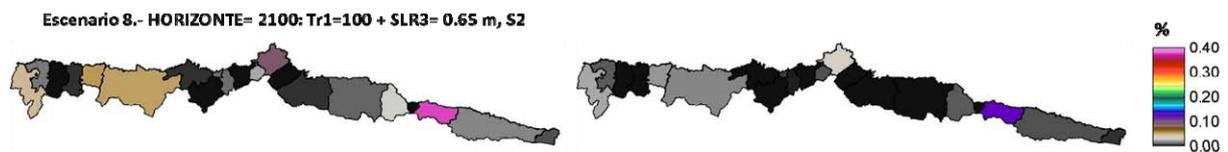


Figura 3.89. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E8: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 2100 (valor medio modificado localmente), considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

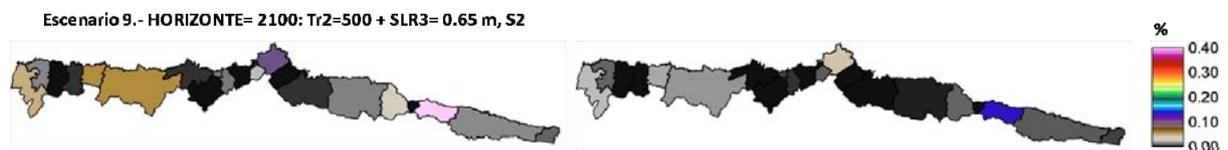


Figura 3.90. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E9: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 2100 (valor medio modificado localmente), considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

La siguiente figura contiene dos gráficos de barras que ilustran los porcentajes de stock de capital de vivienda - contenido afectados en cada concejo y para los escenarios asociados a los eventos extremos de 100 y 500 años de periodo de retorno.

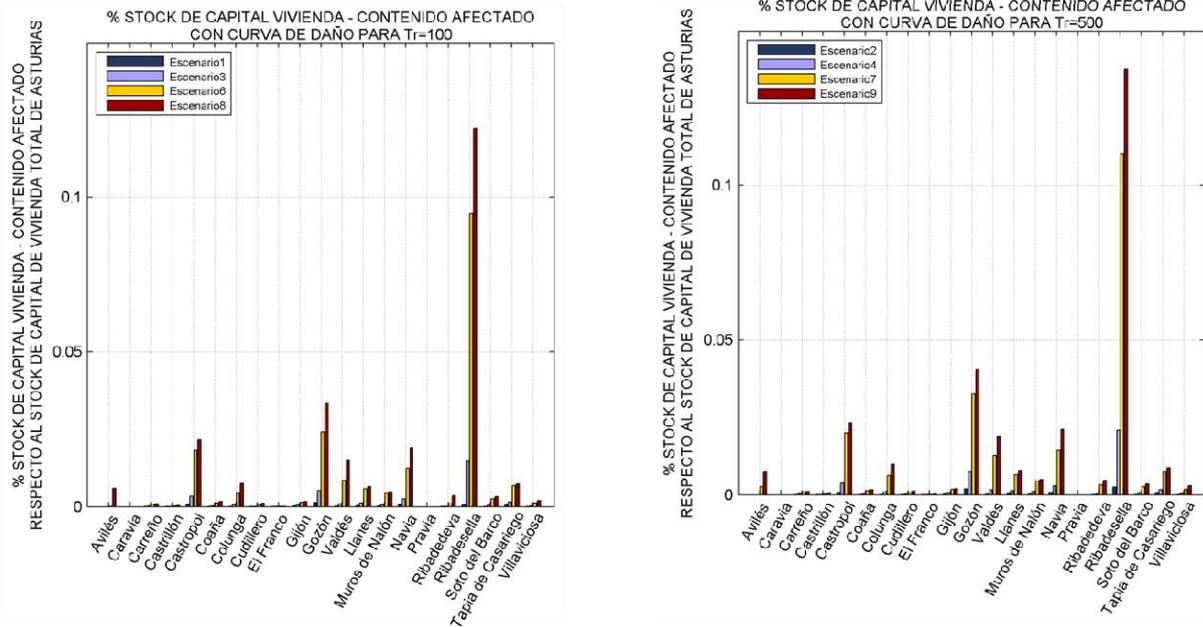


Figura 3.91. Porcentaje de stock de capital de vivienda - contenido afectado respecto al stock de capital de vivienda total de Asturias: escenarios 1, 3, 6 y 8 (panel izquierdo) y escenarios 2, 4, 7 y 9 (panel derecho), considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas. Los daños que se muestran son efectivos.

Las figuras 3.92-3.100 muestran las consecuencias derivadas de los escenarios de riesgo propuestos sobre el stock de capital industrial. Del mismo modo que en el caso del stock de capital de vivienda, los datos de los que se dispone están agregados a nivel de todo el Principado de Asturias. Por este motivo, se ha aplicado una tasa de crecimiento homogénea en todo el litoral, que en esta ocasión asciende al 2.52% anual. Si bien los resultados han sido proyectados a los distintos años horizonte, el hecho de implementar la misma tasa en todos los concejos, resulta en el mismo patrón que si no se tuviesen en consideración variaciones en los indicadores económicos. La diferencia, análogamente al sector de vivienda, es que se alcanzan porcentajes de afección más elevados.



Figura 3.92. Stock de capital industrial afectado para E1: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el clima actual. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.93. Stock de capital industrial afectado para E2: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno en el clima actual. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.94. Stock de capital industrial afectado para E3: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.95. Stock de capital industrial afectado para E4: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.96. Stock de capital industrial afectado para E5: Inundación permanente por aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100, considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas. El daño producido es máximo.



Figura 3.97. Stock de capital industrial afectado para E6: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100, considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.98. Stock de capital industrial afectado para E7: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100, considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.99. Stock de capital industrial afectado para E8: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100, considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.100. Stock de capital industrial afectado para E9: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100, considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

La figura 3.101 está compuesta por dos gráficos de barras que ilustran las diferencias en los porcentajes de afección sobre el stock de capital industrial para los escenarios de riesgo planteados. Se observa cómo Avilés alcanzará porcentajes de stock de capital industrial afectado muy elevados con respecto a los obtenidos sin tener en cuenta las proyecciones de los datos económicos, llegando al entorno del 2.3% y del 3% para los escenarios de 63.2 cm de aumento del nivel medio del mar combinados con eventos de periodo de retorno de 100 y 500 años, respectivamente, tras la aplicación de curvas de daño.

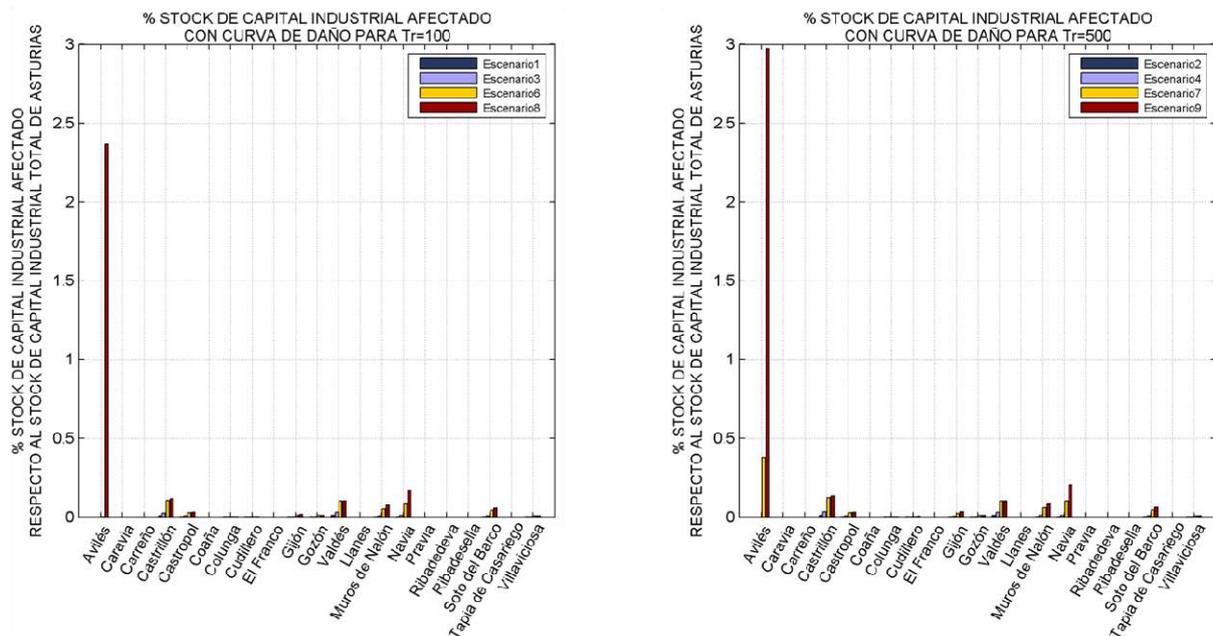


Figura 3.101. Porcentaje de stock de capital industrial afectado respecto al stock de capital industrial total de Asturias: escenarios 1, 3, 6 y 8 (panel izquierdo) y escenarios 2, 4, 7 y 9 (panel derecho), considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas. Los daños que se muestran son efectivos.

La figura 3.102 muestra los porcentajes del stock de capital afectado, por sectores, respecto al stock de capital total de cada sector agregado a nivel provincial. De igual modo que en el caso de las figuras 3.106 y 3.107, los resultados que se muestran en los gráficos de barras responden a las consecuencias tras la aplicación de las curvas de daño correspondientes, es decir, a daños efectivos.

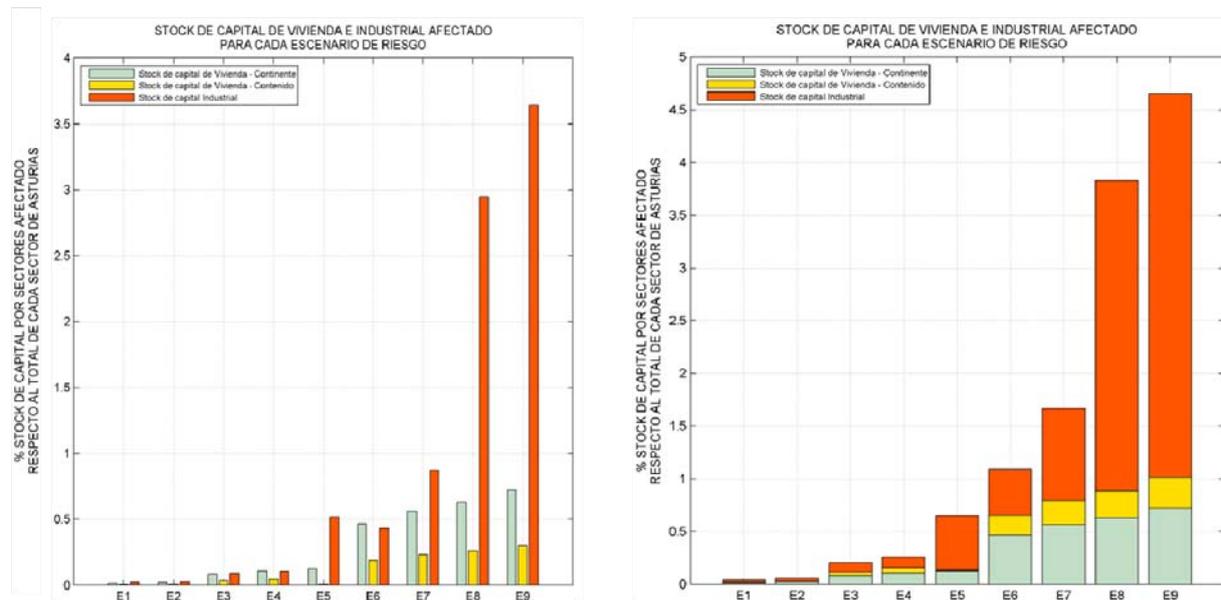


Figura 3.102. Porcentaje de stock de capital afectado por sectores respecto al total de stock de capital agregado a nivel provincial de cada sector, considerando las proyecciones de las variables socioeconómicas.

Finalmente, en lo que respecta al stock de capital, se muestran las consecuencias derivadas de los escenarios de riesgo descontados. Tal y como se explica en el apartado 3.3.1.3, para tratar homogéneamente y hacer comparables los resultados obtenidos para diferentes horizontes temporales, estos deben descontarse y así reducirse a su valor presente, de forma que no sólo estén expresados en unidades monetarias constantes sino que, además, se haya tenido en cuenta el impacto diferenciado entre distintos años horizonte. Las tasas de descuento aplicadas son del 2% para 2050 y del 1% para 2100.

En primer lugar se muestra la distribución espacial de los resultados obtenidos para el stock de capital de vivienda- continente (véanse figuras 3.103-3.111). Si bien es necesaria la aplicación de una tasa de descuento para poder comparar consecuencias dispersas en el tiempo, ésta no es fácil de determinar ya que depende de varios factores, entre ellos la tasa de crecimiento que se ha empleado para proyectar las variables. En este caso, la tasa de aumento anual considerada para evaluar el stock de capital de vivienda en distintos años horizonte es del 1.946%. Dado que la tasa de descuento empleada para reducir los resultados de 2050 a su valor del presente es del 2%, y a pesar de que el aumento del nivel medio del mar a mitad de siglo conlleva mayores inundaciones y, por tanto, mayores daños, se asume que las consecuencias económicas a medio plazo puedan alcanzar, en algún caso, valores menores que en la actualidad. Esto es lo que ocurre, por ejemplo, en Castrillón para el escenario de riesgo que combina el evento de 500 años de periodo de retorno y un incremento del nivel medio del mar de 0.24 m (véase la figura 3.106), escenario en el que dicho concejo alcanza un porcentaje de afección del 0.000068% frente al 0.000065% derivado del escenario 2, que tiene en cuenta el evento de 500 años de periodo de retorno para el clima actual, en ambos casos considerando el daño efectivo (véase la figura 3.104). Se puede observar cómo Gozón sufre daños sobre su stock de capital de vivienda desde el escenario representativo del clima presente con un evento extremo de 100 años de periodo de retorno (véase la figura 3.103), donde ya alcanza el 0.0033% de daño efectivo (0.12% de daño máximo). Por otro lado, los concejos que alcanzarán los mayores porcentajes de daños efectivos

son Ribadesella con un 0.14%, Gozón con un 0.04%, Navia y Valdés, ambos últimos con un porcentaje en el entorno del 0.02%, tal y como se puede observar en la figura 3.111.



Figura 3.103. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E1: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el clima actual. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.104. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E2: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno en el clima actual. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.105. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E3: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, considerando los resultados proyectados y descontados. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.106. Stock de capital de vivienda - continente I afectado para E4: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, considerando los resultados proyectados y descontados. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.107. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E5: Inundación permanente por aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100, considerando los resultados proyectados y descontados. El daño producido es máximo.



Figura 3.108. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E6: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio modificado localmente), considerando los resultados proyectados y descontados. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.109. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E7: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio modificado localmente), considerando los resultados proyectados y descontados. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.110. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E8: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100, considerando los resultados proyectados y descontados. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.111. Stock de capital de vivienda - continente afectado para E9: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio modificado localmente), considerando los resultados proyectados y descontados. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

La figura 3.112 muestra dos gráficos de barras con los porcentajes de stock de capital de vivienda afectado para cada concejo y escenario de riesgo, tras descontar los resultados.

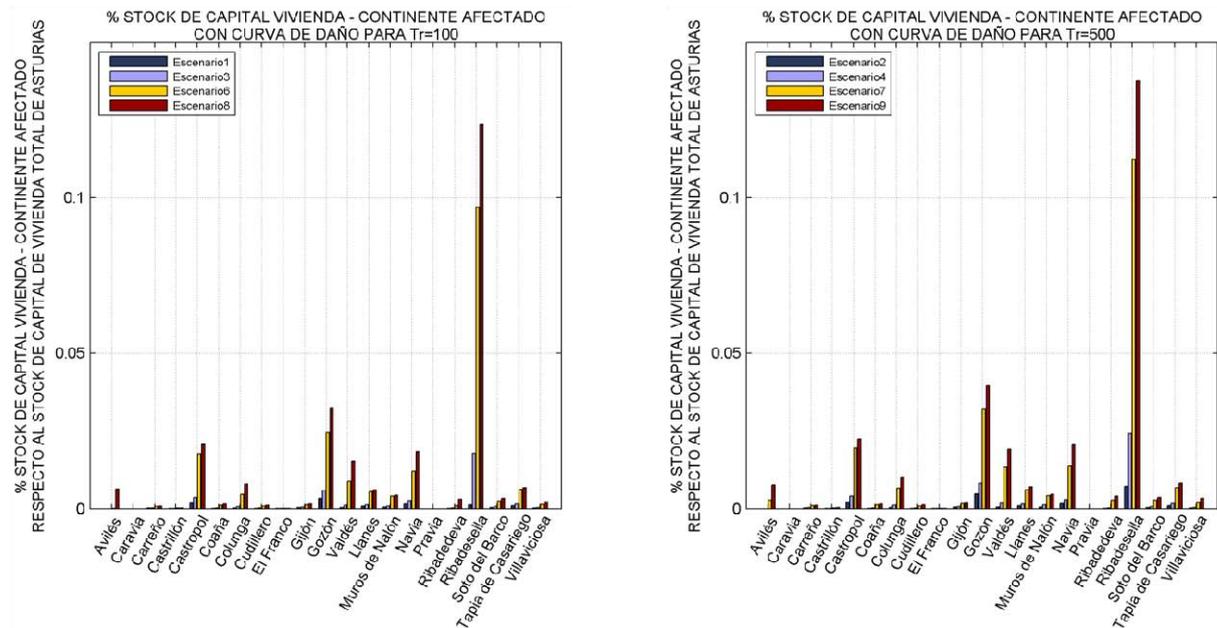


Figura 3.112. Porcentaje de stock de capital de vivienda - continente afectado respecto al stock de capital de vivienda total de Asturias: escenarios 1, 3, 6 y 8 (panel izquierdo) y escenarios 2, 4, 7 y 9 (panel derecho), considerando los resultados proyectados y descontados. Los daños que se muestran son efectivos.

Las figuras 3.113-3.121 muestra la distribución espacial de los daños sobre el stock de capital de vivienda - contenido descontados y expresados en porcentaje respecto al stock de capital de vivienda agregado a nivel provincial. El patrón es muy similar al observado en las consecuencias del stock de capital de vivienda - continente.

Escenario 1.- CLIMA PRESENTE: Tr1=100, S0



Figura 3.113. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E1: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el clima actual. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

Escenario 2.- CLIMA PRESENTE: Tr2=500, S0

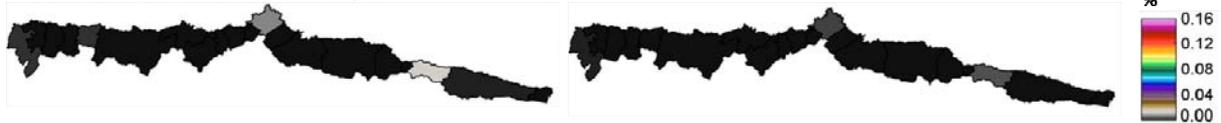


Figura 3.114. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E2: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno en el clima actual. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

Escenario 3.- HORIZONTE= 2050: Tr1=100 + SLR1= 0.24 m, S1 descontado



Figura 3.115. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E3: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, considerando los resultados proyectados y descontados. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

Escenario 4.- HORIZONTE= 2050: Tr1=500 + SLR1= 0.24 m, S1 descontado

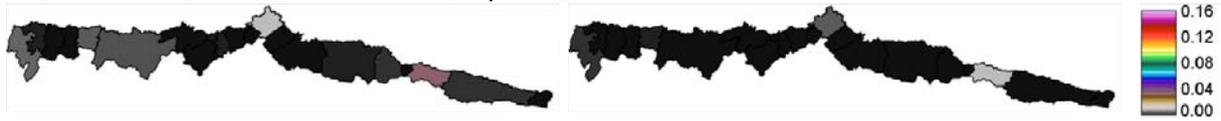


Figura 3.116. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E4: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, considerando los resultados proyectados y descontados. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

Escenario 5.- HORIZONTE= 2100: SLR4= 1 m, S2 descontado



Figura 3.117. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E5: Inundación permanente por aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100, considerando los resultados proyectados y descontados. El daño producido es máximo.

Escenario 6.- HORIZONTE= 2100: Tr1=100 + SLR2= 0.45 m, S2 descontado



Figura 3.118. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E6: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio modificado localmente), considerando los resultados proyectados y descontados. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.119. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E7: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio modificado localmente), considerando los resultados proyectados y descontados. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.120. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E8: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio modificado localmente), considerando los resultados proyectados y descontados. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.121. Stock de capital de vivienda - contenido afectado para E9: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio modificado localmente), considerando los resultados proyectados y descontados. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

La figura 3.122 ilustra los distintos porcentajes de afección respecto al stock de capital de vivienda de Asturias para cada concejo y escenario de riesgo considerado.

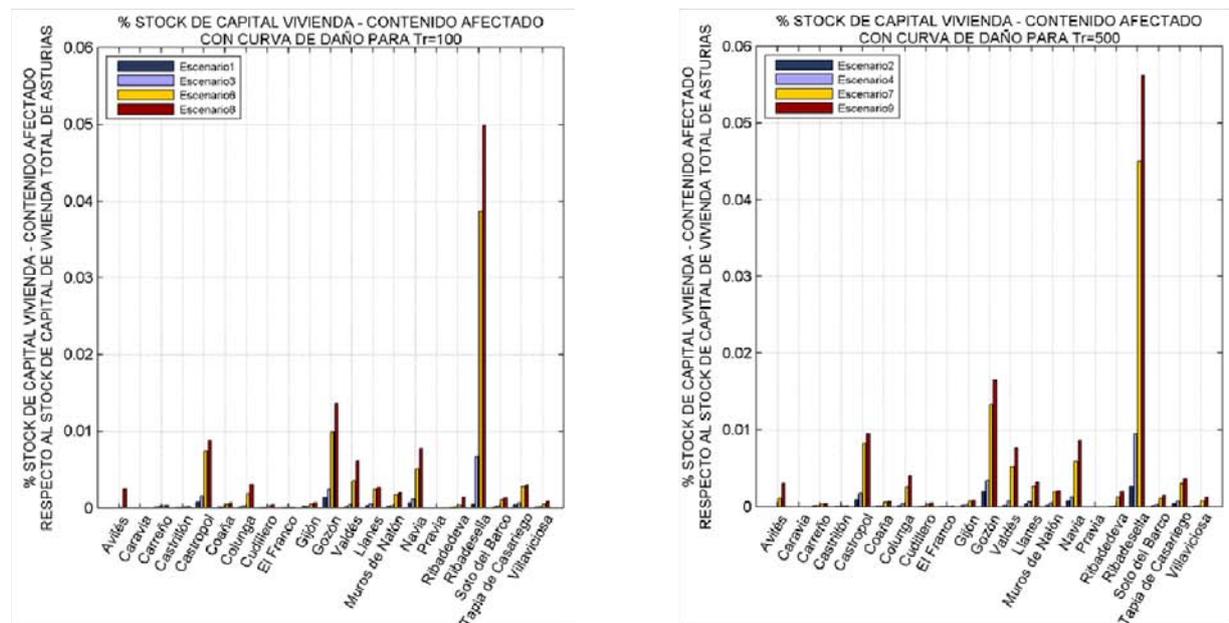


Figura 3.122. Porcentaje de stock de capital de vivienda - continente afectado respecto al stock de capital de vivienda total de Asturias: escenarios 1, 3, 6 y 8 (panel izquierdo) y escenarios 2, 4, 7 y 9 (panel derecho), considerando los resultados proyectados y descontados. Los daños que se muestran son efectivos.

A continuación, se muestran las consecuencias sobre el stock de capital industrial. Análogamente al stock de capital de vivienda, los resultados que se presentan han sido proyectados y descontados. Como se puede observar en las figuras 3.123-3.131, los daños sobre el stock de capital industrial son prácticamente inapreciables para los escenarios del clima presente (véanse figuras 3.123 y 3.124). El concejo de Valdés mostrará consecuencias apreciables a partir de 2050, alcanzando porcentajes de daño efectivo en el entorno del 0.01% (véanse las figuras 3.125 y 3.126). El concejo que registra mayores consecuencias es Avilés, llegando al 1.21% de daño efectivo (3.25% de daño máximo), para el escenario más pesimista (véase la figura 3.131). Otros escenarios con consecuencias importantes son Navia, Muros de Nalón, Soto del Barco y Castrillón.



Figura 3.123. Stock de capital industrial afectado para E1: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el clima actual. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.124. Stock de capital industrial afectado para E2: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno en el clima actual. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.125. Stock de capital industrial afectado para E3: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, considerando los resultados proyectados y descontados. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.126. Stock de capital industrial afectado para E4: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, considerando los resultados proyectados y descontados. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).



Figura 3.127. Stock de capital industrial afectado para E5: Inundación permanente por aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100, considerando los resultados proyectados y descontados. El daño producido es máximo.

Escenario 6.- HORIZONTE= 2100: Tr1=100 + SLR2= 0.45 m, S2 descontado



Figura 3.128. Stock de capital industrial afectado para E6: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100, considerando los resultados proyectados y descontados. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

Escenario 7.- HORIZONTE= 2100: Tr2=500 + SLR2= 0.45 m, S2 descontado



Figura 3.129. Stock de capital industrial afectado para E7: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100, considerando los resultados proyectados y descontados. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

Escenario 8.- HORIZONTE= 2100: Tr1=100 + SLR3= 0.65 m, S2 descontado



Figura 3.130. Stock de capital industrial afectado para E8: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100, considerando los resultados proyectados y descontados. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

Escenario 9.- HORIZONTE= 2100: Tr2=500 + SLR3= 0.65 m, S2 descontado



Figura 3.131. Stock de capital industrial afectado para E9: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100, considerando los resultados proyectados y descontados. Daño máximo (panel izquierdo) y daño efectivo (panel derecho).

La figura 3.132 muestra los porcentajes de stock de capital industrial afectado respecto al stock de capital industrial total de la provincia. Como en otras ocasiones, escenarios asociados a 100 y 500 años de periodo de retorno han recibido tratamiento independiente.

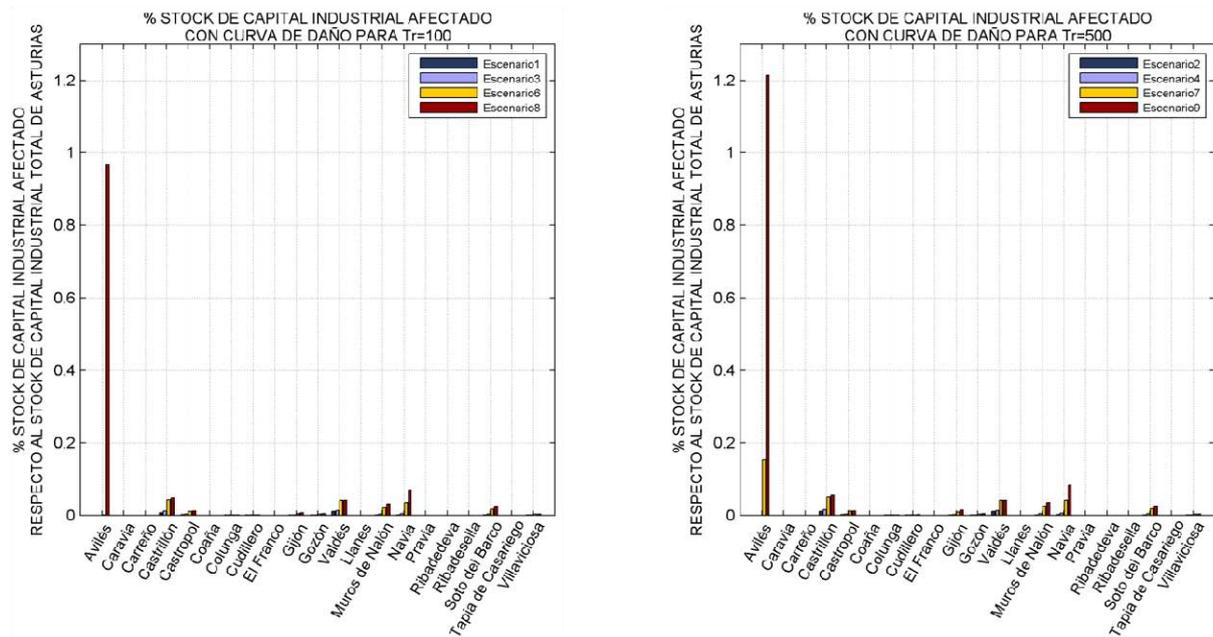


Figura 3.132. Porcentaje de stock de capital industrial afectado respecto al stock de capital industrial total de Asturias: escenarios 1, 3, 6 y 8 (panel izquierdo) y escenarios 2, 4, 7 y 9 (panel derecho), considerando los resultados proyectados y descontados. Los daños que se muestran son efectivos.

La figura 3.133 muestra las consecuencias sobre el stock de capital de los sectores vivienda e industrial expresadas en porcentaje respecto al total del stock de capital de cada sector agregado a nivel provincial.

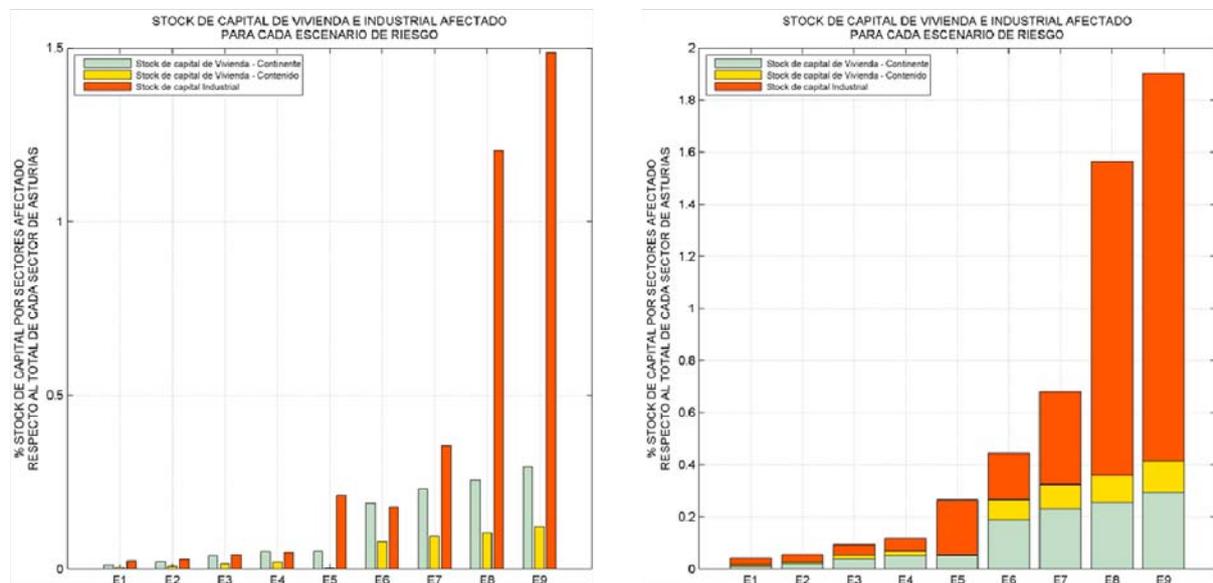


Figura 3.133. Porcentaje de stock de capital afectado por sectores respecto al total de stock de capital agregado a nivel provincial de cada sector, considerando los resultados proyectados y descontados.

3.4.2.2 Flujos

En este apartado se muestran las consecuencias sobre el Valor Añadido Bruto (VAB) agrícola e industrial bajo distintas hipótesis: cambios en las variables climáticas (escenarios climáticos), cambios en las variables climáticas y socioeconómicas sin

descuento (escenarios de riesgo sin descontar) y cambios en las variables climáticas y socioeconómicas con descuento (escenarios de riesgo descontados). En los casos del VAB agrícola e industrial la tasa anual de crecimiento es nula por lo que los escenarios climáticos y de riesgo sin descontar coinciden. Por otro lado, cabe recordar que, tal y como se explica en el apartado 3.3.1.3 de este documento, las consecuencias sobre el VAB industrial se han determinado en función de la cota de inundación alcanzada en cada punto, a excepción del escenario de inundación permanente en el que se ha asumido la pérdida total de los terrenos inundados. Para el caso del VAB agrícola, sin embargo, se ha considerado la situación pésima en la que la inundación se produce siempre antes de la cosecha, por lo que las pérdidas en la producción son totales, como en el caso de la inundación permanente.

En primer lugar, se presentan los resultados derivados de los escenarios climáticos/de riesgo sin descontar. Los resultados están expresados en porcentaje de VAB de los sectores agrícola o industrial, según corresponda, respecto al VAB total de cada sector y concejo.

Las figuras 3.134-3.142 muestran la distribución espacial de las consecuencias sobre el VAB agrícola para cada uno de los escenarios considerados. Los datos de VAB de los que se dispone están desagregados a nivel de concejo e independientemente de que los resultados estén expresados en porcentaje respecto al total de cada concejo, como orden de magnitud, es importante señalar que el VAB agrícola agregado a nivel provincial asciende a 320 270 000 EUR (año de referencia 2010, Sadej). Se puede observar que Muros de Nalón es el concejo sobre el que se producen mayores daños, alcanzando para todos y cada uno de los escenarios propuestos un porcentaje en torno al 0.8% de VAB agrícola afectado respecto al VAB agrícola total del concejo. Soto del Barco y Ribadesella alcanzan porcentajes de daño de 0.61% y 0.3%, respectivamente, para el escenario más pesimista (véase la figura 3.152). Por otro lado, el concejo de Avilés está exento de daño sobre el VAB agrícola para cualquiera de los escenarios propuestos.

Escenario 1.- CLIMA PRESENTE: Tr1=100, S0



Figura 3.134. VAB agrícola afectado para E1: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el clima actual.

Escenario 2. CLIMA PRESENTE: Tr2=500, S0



Figura 3.135. VAB agrícola afectado para E2: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno en el clima actual.

Escenario 3.- HORIZONTE= 2050: Tr1=100 + SLR1=0.24 m, S1

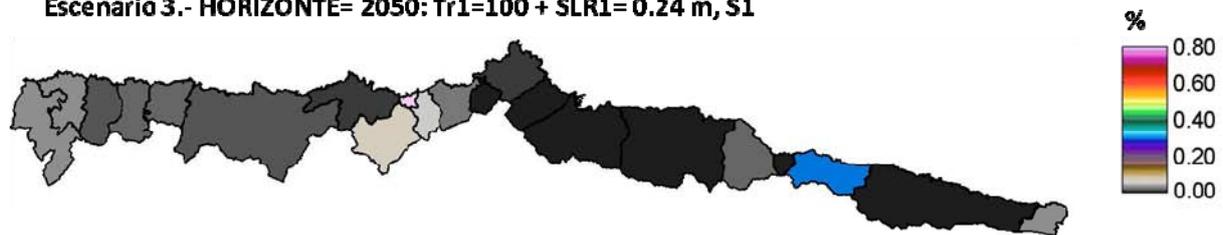


Figura 3.136. VAB agrícola afectado para E3: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050.

Escenario 4.- HORIZONTE= 2050: Tr1=500 + SLR1=0.24 m, S1

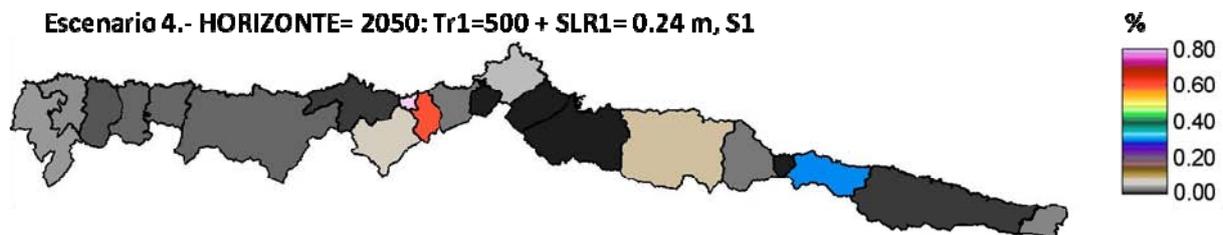


Figura 3.137. VAB agrícola afectado para E4: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050.

Escenario 5.- HORIZONTE= 2100: SLR4= 1 m, S2



Figura 3.138. VAB agrícola afectado para E5: inundación permanente debida a un aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100.

Escenario 6.- HORIZONTE= 2100: Tr1=100 + SLR2=0.45 m, S2

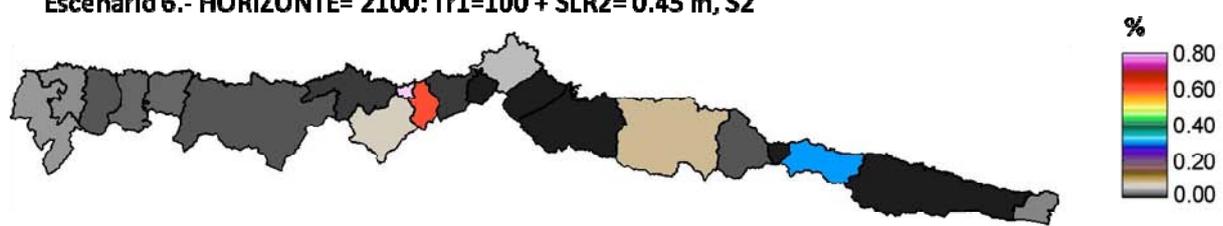


Figura 3.139. VAB agrícola afectado para E6: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio modificado localmente).

Escenario 7.- HORIZONTE= 2100: Tr2=500 + SLR2=0.45 m, S2



Figura 3.140. VAB agrícola afectado para E7: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio modificado localmente).

Escenario 8.- HORIZONTE= 2100: Tr1=100 + SLR3= 0.65 m, SZ



Figura 3.141. VAB agrícola afectado para E8: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio modificado localmente)..

Escenario 9.- HORIZONTE= 2100: Tr2=500 + SLR3= 0.65 m, SZ

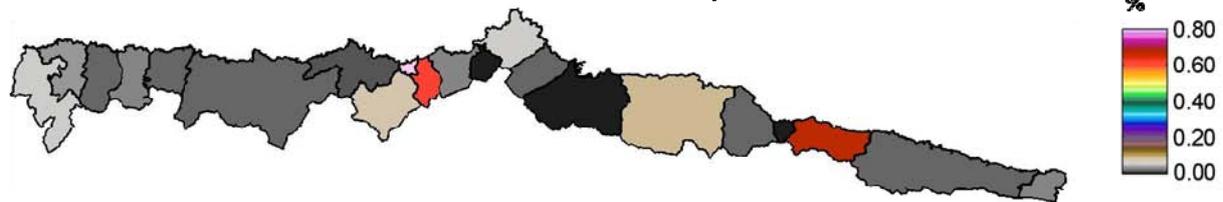


Figura 3.142. VAB agrícola afectado para E9: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio modificado localmente)..

La figura 3.143 ilustra los porcentajes de VAB agrícola afectado para cada concejo, recibiendo un tratamiento independiente los concejos asociados a los distintos periodos de retorno considerados.

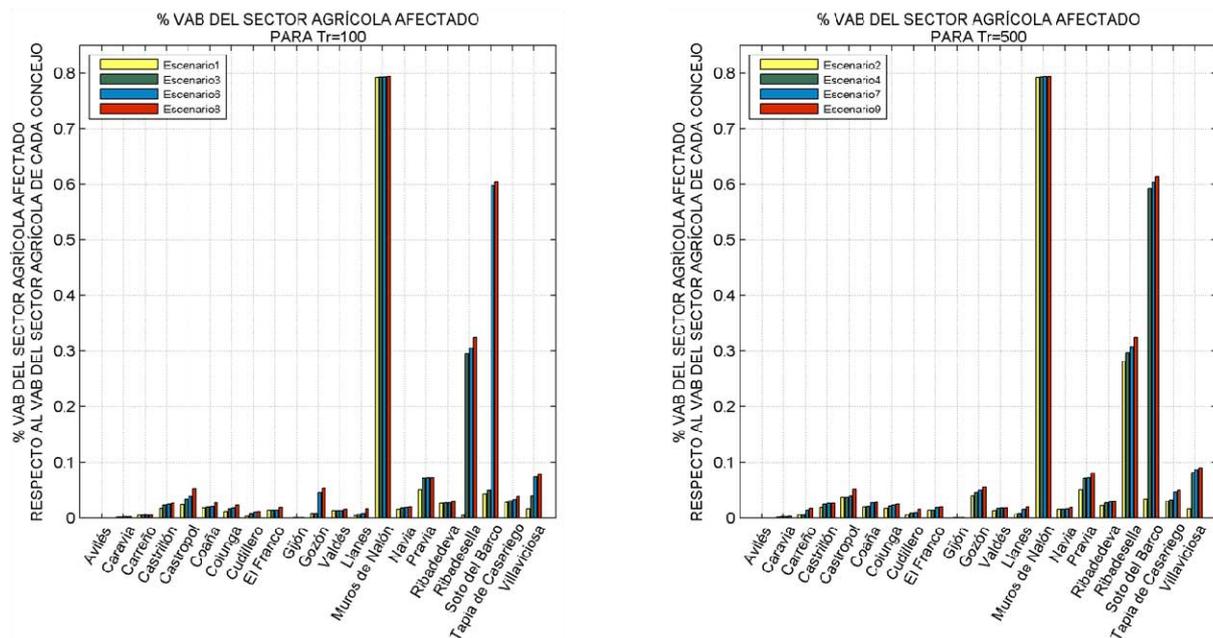


Figura 3.143. Porcentaje de VAB agrícola afectado respecto al VAB agrícola de cada concejo: escenarios 1, 3, 6 y 8 (panel izquierdo) y escenarios 2, 4, 7 y 9 (panel derecho).

Las figuras 3.144-3.152 presentan la distribución espacial de las consecuencias del impacto de inundación sobre el VAB industrial de cada concejo del litoral asturiano. Análogamente al caso del VAB agrícola, los resultados están expresados en porcentaje respecto al VAB industrial de cada concejo. No obstante, se considera importante señalar, para tener un orden de magnitud al respecto de la producción industrial en el

Principado de Asturias, que el VAB industrial de la provincia asciende a 4 573 668 000 EUR (año de referencia 2010, Sadei). Se puede observar que los mayores daños se producen para el escenario de inundación permanente de 1 m de aumento del nivel medio del mar (véase la figura 3.148), donde Valdés, el concejo que sufrirá las mayores consecuencias, alcanzará un 1.47% del VAB industrial afectado respecto al VAB del concejo, seguido de Castropol, Navia y Villaviciosa con porcentajes de 0.43%, 0.41% y 0.40%, respectivamente. Tal y como se ha explicado anteriormente, esto se debe a que las consecuencias derivadas de éste escenario no responden a la cota de inundación alcanzada en cada punto sino que se considera la pérdida total de los terrenos inundados, quedando estos anegados y perdiendo el uso y disfrute de los mismos.

Escenario 1.- CLIMA PRESENTE: Tr1=100, S0



Figura 3.144. VAB industrial afectado para E1: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el clima actual.

Escenario 2.- CLIMA PRESENTE: Tr2=500, S0



Figura 3.145. VAB industrial afectado para E1: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el clima actual.

Escenario 3.- HORIZONTE= 2050: Tr1=100 + SLR1= 0.24 m, S1



Figura 3.146. VAB industrial afectado para E3: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050.

Escenario 4.- HORIZONTE= 2050: Tr1=500 + SLR1= 0.24 m, S1



Figura 3.147. VAB industrial afectado para E4: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050.

Escenario 5.- HORIZONTE= 2100: SLR4= 1 m, S2



Figura 3.148. VAB industrial afectado para E5: inundación permanente debida a un aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100.

Escenario 6.- HORIZONTE= 2100: Tr1=100 + SLR2= 0.45 m, S2



Figura 3.149. VAB industrial afectado para E6: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio modificado localmente)..

Escenario 7.- HORIZONTE= 2100: Tr2=500 + SLR2= 0.45 m, S2



Figura 3.150. VAB industrial afectado para E7: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio modificado localmente)..

Escenario 8.- HORIZONTE= 2100: Tr1=100 + SLR3= 0.65 m, S2



Figura 3.151. VAB industrial afectado para E8: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio modificado localmente)..

Escenario 9.- HORIZONTE= 2100: Tr2=500 + SLR3= 0.65 m, S2



Figura 3.152. VAB industrial afectado para E9: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio modificado localmente)..

La figura 3.153 ilustra dos gráficos de barras con las consecuencias derivadas de los escenarios asociados a 100 y a 500 años de periodo de retorno. Se puede observar que los mayores daños se producen en Muros de Nalón, Navia y Soto del Barco para los escenarios que tienen en cuenta incrementos del nivel medio del mar. Por otro lado, sólo aumentos de 63.2 cm de nivel (en el caso de 500 años de periodo de retorno, también +48.5 cm) producen daños importantes en Avilés, muy probablemente a causa de los desbordamientos de la ría.

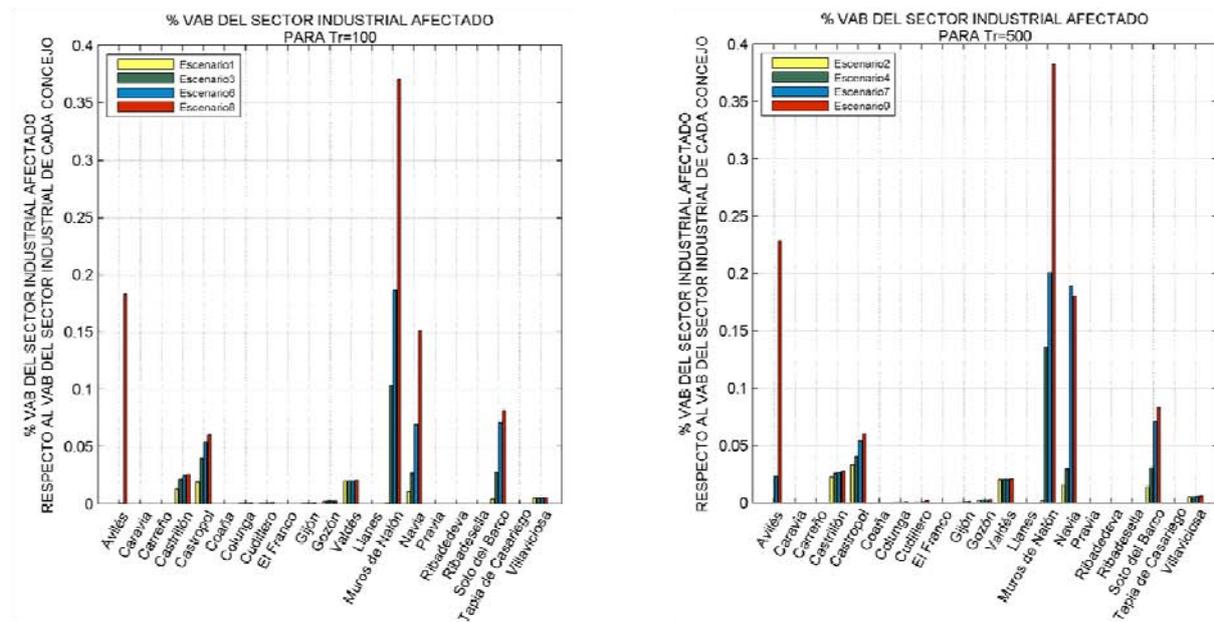


Figura 3.153. Porcentaje de VAB industrial afectado respecto al VAB industrial de cada concejo: escenarios 1, 3, 6 y 8 (panel izquierdo) y escenarios 2, 4, 7 y 9 (panel derecho).

A continuación, se muestran los resultados obtenidos tras la aplicación de la tasa de descuento anual del 2% a 2050 y del 1% a 2100, es decir, para los escenarios de riesgo descontados. Dado que la tasa de crecimiento anual implementada tanto al VAB agrícola como al VAB industrial es nula, se asume que el hecho de descontar para reducir los daños a su valor presente, puede proporcionar, en muchos casos, mayores daños en el presente que en el futuro. Una vez más, se debe hacer hincapié en la sensibilidad de los resultados frente al empleo de unas tasas de crecimiento y descuento u otras.

Las figuras 3.154-3.162 presentan la distribución espacial de las consecuencias económicas descontadas sobre el VAB agrícola de cada concejo del litoral asturiano. Como era de esperar, los mayores daños se producirán en Muros de Nalón para los escenarios del clima presente, alcanzando prácticamente el 0.80% del VAB agrícola afectado respecto al VAB agrícola del concejo (véanse las figuras 3.166 y 3.167). Ribadesella alcanzará el 0.28% para el escenario del evento extremo de 500 años de periodo de retorno para el clima presente (véase la figura 3.166), porcentaje que, tras aplicar el descuento correspondiente, se reducirá para el resto de escenarios. Por otro lado, el concejo de Soto del Barco, pese a la implementación de la tasa de descuento, sufrirá el mayor daño para el escenario 4, que combina un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050 y el evento extremo de 500 años de periodo de retorno (véase la figura 3.168), alcanzando el 0.27% de su VAB agrícola afectado. Esto ocurre porque con

el aumento de nivel, aumentará considerablemente sus activos inundados respecto al clima presente.

Escenario 1.- CLIMA PRESENTE: Tr1=100, S0



Figura 3.154. VAB agrícola afectado para E1: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el clima actual.

Escenario 2.- CLIMA PRESENTE: Tr2=500, S0



Figura 3.155. VAB agrícola afectado para E2: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno en el clima actual.

Escenario 3. HORIZONTE= 2050: Tr1=100 + SLR1= 0.24 m, S1 descontado



Figura 3.156. VAB agrícola afectado para E3: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, considerando resultados descontados.

Escenario 4.- HORIZONTE= 2050: Tr1=500 + SLR1= 0.24 m, S1 descontado



Figura 3.157. VAB agrícola afectado para E4: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, considerando resultados descontados.

Escenario 5.- HORIZONTE= 2100: SLR4= 1 m, S2 descontado



Figura 3.158. VAB agrícola afectado para E5: inundación permanente debida a un aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100, considerando resultados descontados.

Escenario 6.- HORIZONTE= 2100: Tr1=100 + SLR2= 0.45 m, S2 descontado



Figura 3.159. VAB agrícola afectado para E6: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100, considerando resultados descontados.

Escenario 7.- HORIZONTE= 2100: Tr2=500 + SLR2= 0.45 m, S2 descontado



Figura 3.160. VAB agrícola afectado para E7: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100, considerando resultados descontados.

Escenario 8.- HORIZONTE= 2100: Tr1=100 + SLR3= 0.65 m, S2 descontado



Figura 3.161. VAB agrícola afectado para E8: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100, considerando resultados descontados.

Escenario 9.- HORIZONTE= 2100: Tr2=500 + SLR3= 0.65 m, S2 descontado



Figura 3.162. VAB agrícola afectado para E9: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100, considerando resultados descontados.

La siguiente figura muestra los distintos porcentajes de VAB del sector agrícola afectados respecto al VAB agrícola de cada concejo, para los escenarios que consideran el evento extremo de 100 y 500 años de periodo de retorno.

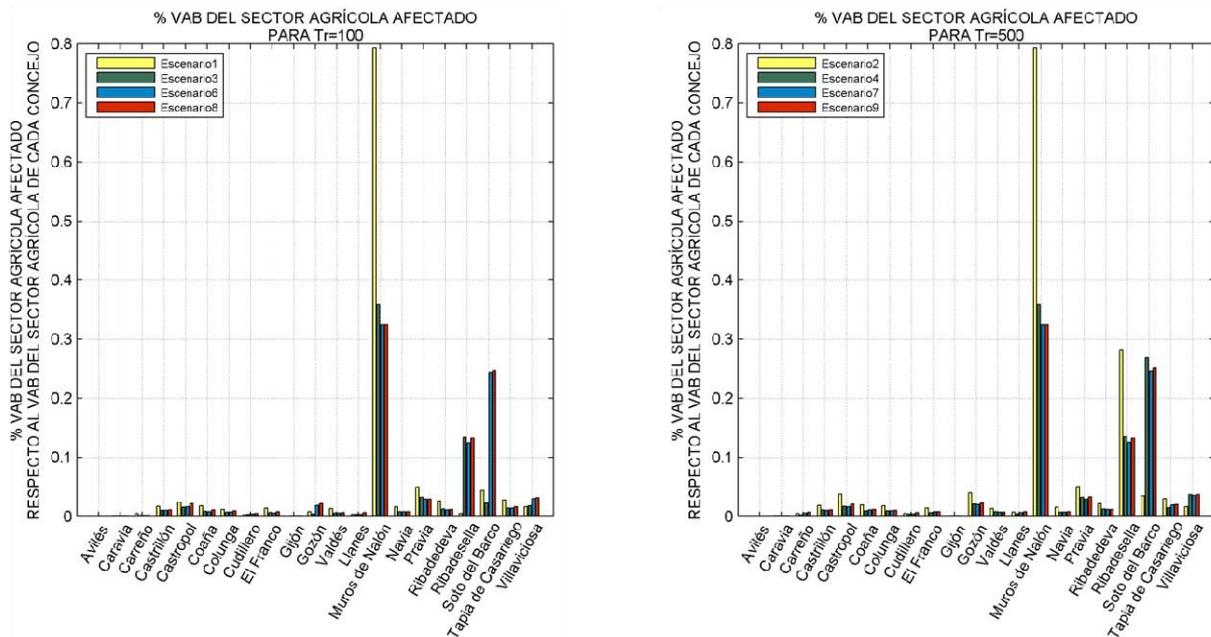


Figura 3.163. Porcentaje de VAB agrícola afectado respecto al VAB agrícola de cada concejo: escenarios 1, 3, 6 y 8 (panel izquierdo) y escenarios 2, 4, 7 y 9 (panel derecho), considerando resultados descontados.

La distribución espacial del daño económico descontado derivado de los escenarios de riesgo sobre el VAB industrial se presenta en las figuras 3.164-3.172. En esta ocasión ocurre algo similar al caso del VAB agrícola descontado, pues en ambos casos la tasa de crecimiento anual de los indicadores de producción se ha asumido nula. El concejo con mayor afección será Valdés, que alcanzará el 0.60% del VAB industrial afectado para el escenario de inundación permanente (véase la figura 3.168), bastante inferior al observado en el caso de no descontar los resultados. Lo mismo sucederá con Castropol, Navia y Villaviciosa.

Escenario 1.- CLIMA PRESENTE: Tr1=100, S0



Figura 3.164. VAB industrial afectado para E1: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el clima actual.

Escenario 2.- CLIMA PRESENTE: Tr2=500, S0



Figura 3.165. VAB industrial afectado para E2: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno en el clima actual.

Escenario 3.- HORIZONTE= 2050: Tr1=100 + SLR1=0.24 m, S1 descontado



Figura 3.166. VAB industrial afectado para E3: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, considerando resultados descontados.

Escenario 4.- HORIZONTE= 2050: Tr1=500 + SLR1=0.24 m, S1 descontado



Figura 3.167. VAB industrial afectado para E4: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, considerando resultados descontados.

Escenario 5.- HORIZONTE= 2100: SLR4= 1 m, S2 descontado



Figura 3.168. VAB industrial afectado para E5: inundación permanente debida a un aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100, considerando resultados descontados (valor medio modificado localmente).

Escenario 6.- HORIZONTE= 2100: Tr1=100 + SLR2=0.45 m, S2 descontado

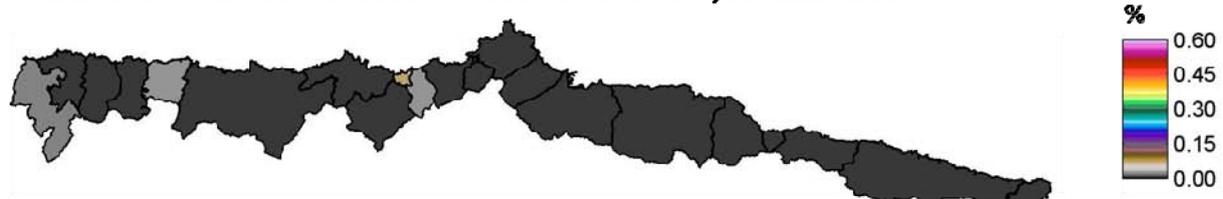


Figura 3.169. VAB industrial afectado para E6: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100, considerando resultados descontados (valor medio modificado localmente).

Escenario 7.- HORIZONTE= 2100: Tr2=500 + SLR2=0.45 m, S2 descontado



Figura 3.170. VAB industrial afectado para E7: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100, considerando resultados descontados (valor medio modificado localmente).

Escenario 8.- HORIZONTE= 2100: Tr1=100 + SLR3= 0.65 m, S2 descontado



Figura 3.171. VAB industrial afectado para E8: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100, considerando resultados descontados (valor medio modificado localmente).

Escenario 9.- HORIZONTE= 2100: Tr2=500 + SLR3= 0.65 m, S2 descontado



Figura 3.172. VAB industrial afectado para E9: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100, considerando resultados descontados (valor medio modificado localmente).

La figura 3.173 muestra las consecuencias económicas descontadas expresadas como porcentaje de VAB industrial afectado sobre el VAB industrial de cada concejo, para los escenarios que tienen en cuenta la contribución del evento de 100 y 500 años de periodo de retorno en la inundación. A excepción del escenario de inundación permanente que es para el que se producirán los mayores daños sobre la producción industrial, los concejos más afectados serán Muros de Nalón, Navia y Soto del Barco, para los distintos aumentos del nivel medio del mar considerados, y Avilés, para 62.3 cm de incremento de nivel en el caso del escenario asociado al evento de 100 años de periodo de retorno y para 48.5 cm y 62.3 cm de subida del nivel medio del mar en el caso de considerar el evento de inundación de 500 años de periodo de retorno.

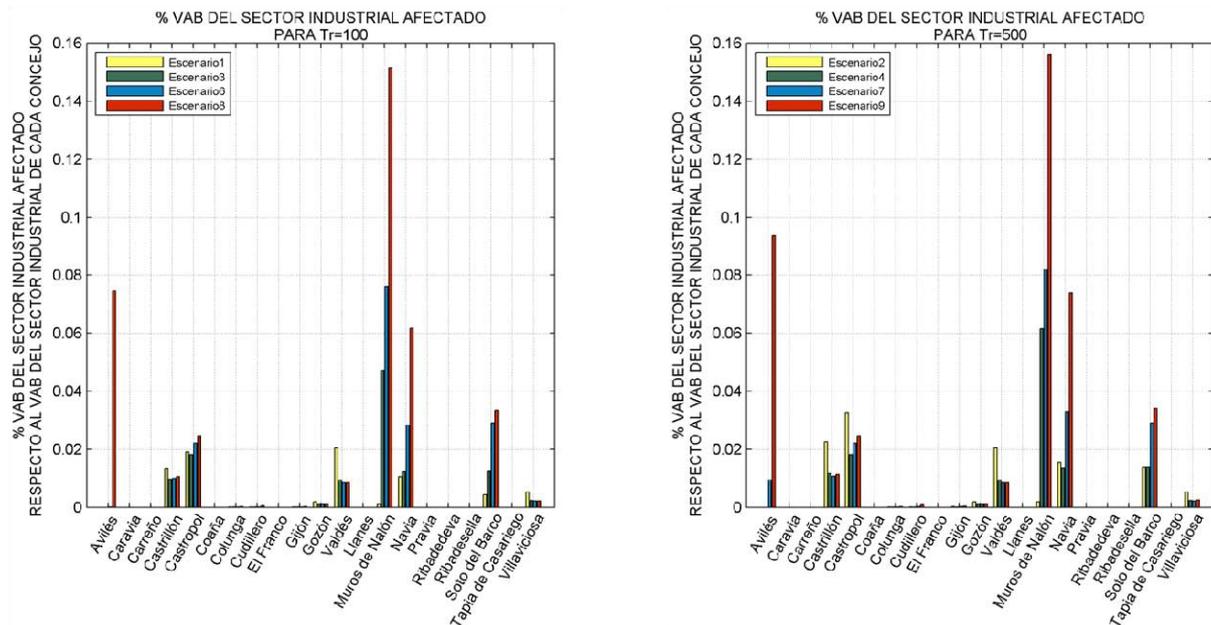


Figura 3.173. Porcentaje de VAB industrial afectado respecto al VAB industrial de cada concejo: escenarios 1, 3, 6 y 8 (panel izquierdo) y escenarios 2, 4, 7 y 9 (panel derecho), considerando resultados descontados.

3.4.2.3 Servicios ecosistémicos

Si bien las consecuencias sobre los servicios ecosistémicos podrían incluirse en el capítulo del riesgo sobre el sistema natural, se ha considerado más conveniente presentarlos como parte del riesgo sobre el sistema socioeconómico por entender el daño sobre los mismos como pérdida de producción de servicios ecosistémicos, expresado en porcentaje respecto al Valor Añadido Bruto (VAB) total de cada concejo. Como orden de magnitud, el VAB total agregado a nivel provincial asciende a la cuantía de 19 918 251 EUR (año de referencia 2010, Sadei).

De igual modo que en casos anteriores, se presentan, a continuación, las consecuencias sobre la producción de servicios ecosistémicos bajo distintas hipótesis: cambios en el clima y cambios en los indicadores socioeconómicos, sin la aplicación de la tasa de descuento y con ella.

En primer lugar, se presenta la distribución espacial de los resultados para los escenarios climáticos que sólo tienen en consideración cambios en las variables climáticas (véanse las figuras 3.174-3.182). Muros de Nalón es el concejo con mayor porcentaje de VAB afectado, ascendiendo en torno al 0.28% para los escenarios que contemplan un aumento del nivel medio del mar de 63.1 cm y 48.7 cm a 2100 combinado con eventos extremos de 100 y 500 años de periodo de retorno (véanse las figuras 3.179-.3.182). Para el escenario más pesimista (véase la figura 3.182), otros concejos con elevado grado de afección serán Soto del Barco, con un 0.18% del VAB del concejo afectado, Tapia de Casariego, con el 0.14%, y Valdés, con un 0.12%.

Escenario 1.- CLIMA PRESENTE: Tr1=100, S0



Figura 3.174. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E1: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el clima actual.

Escenario 2.- CLIMA PRESENTE: Tr2=500, S0



Figura 3.175. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E2: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno en el clima actual, considerando resultados descontados.

Escenario 3.- HORIZONTE= 2050: Tr1=100 + SLR1= 0.24 m, S0

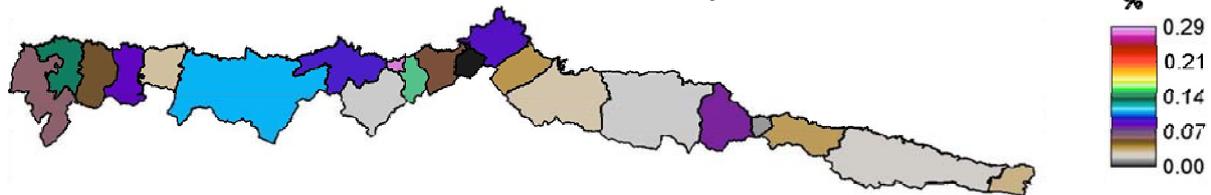


Figura 3.176. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E3: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, considerando resultados sin proyectar ni descontar.

Escenario 4.- HORIZONTE= 2050: Tr1=500 + SLR1= 0.24 m, S0

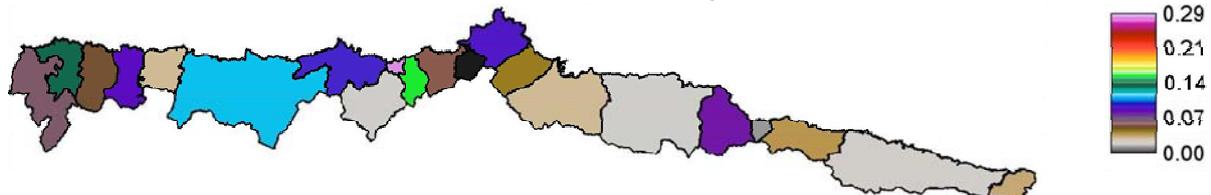


Figura 3.177. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E4: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, considerando resultados sin proyectar ni descontar.

Escenario 5.- HORIZONTE= 2100: SLR4= 1 m, S0

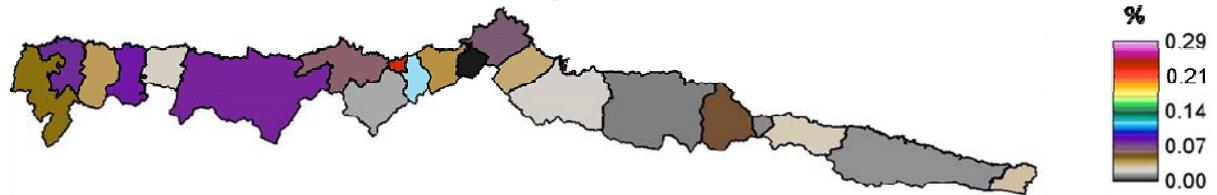


Figura 3.178. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E5: inundación permanente debida a un aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100, considerando resultados sin proyectar ni descontar.

Escenario 6.- HORIZONTE= 2100: Tr1=100 + SLR2= 0.45 m, S0

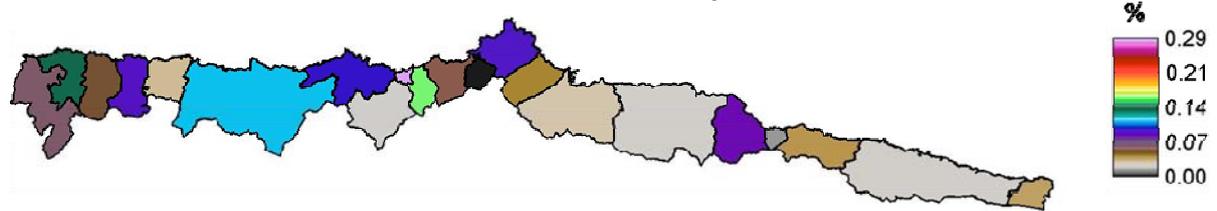


Figura 3.179. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E6: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio modificado localmente), considerando resultados sin proyectar ni descontar.

Escenario 7.- HORIZONTE= 2100: Tr2=500 + SLR2= 0.45 m, S0



Figura 3.180. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E7: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio modificado localmente), considerando resultados sin proyectar ni descontar.

Escenario 8.- HORIZONTE= 2100: Tr1=100 + SLR3= 0.65 m, S0



Figura 3.181. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E8: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio modificado localmente), considerando resultados sin proyectar ni descontar.

Escenario 9.- HORIZONTE= 2100: Tr2=500 + SLR3= 0.65 m, S0

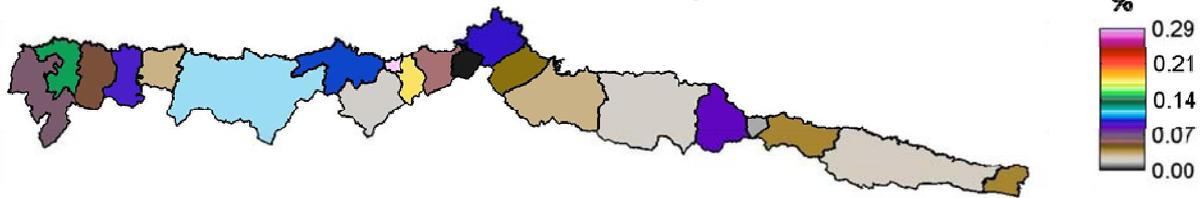


Figura 3.182. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E9: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio modificado localmente), considerando resultados sin proyectar ni descontar.

La figura 3.183 muestra los porcentajes de VAB afectado por concejo y por escenario, agrupando de forma independiente los que tienen consideración el evento de 100 y de 500 años de periodo de retorno. Tal y como se puede apreciar en los gráficos de barras, la inundación que se produce en las márgenes del río Nalón provoca para cada escenario un porcentaje considerable de pérdida de servicios ecosistémicos en el concejo de Muros de Nalón.

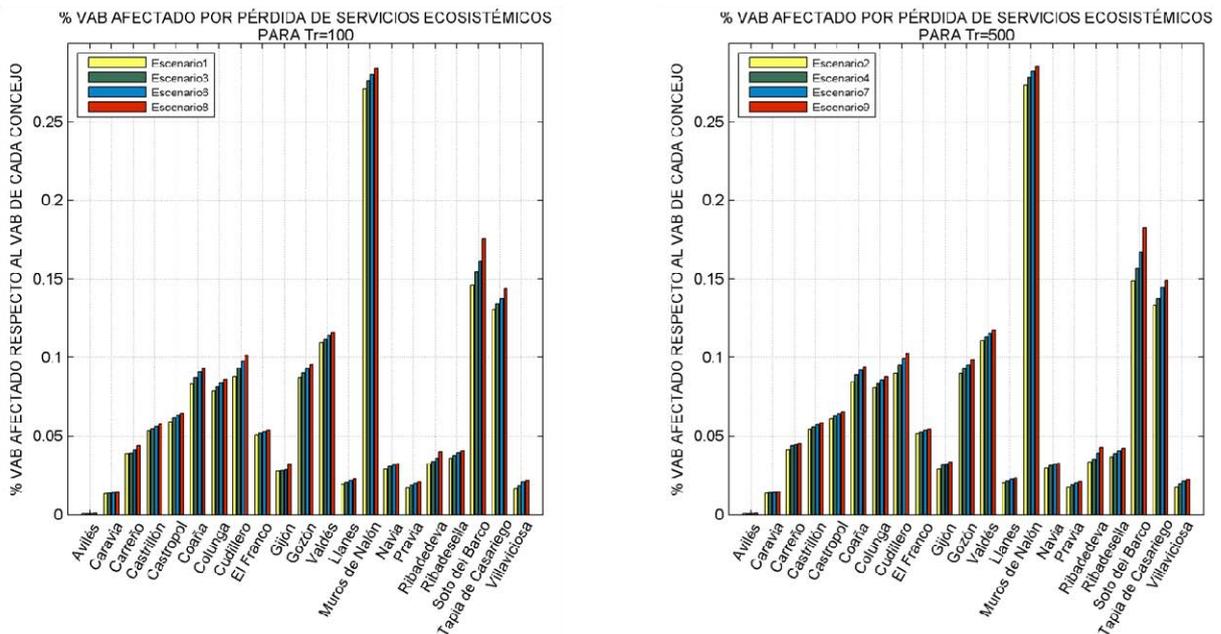


Figura 3.183. Porcentaje de VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos respecto al VAB total de cada concejo: escenarios 1, 3, 6 y 8 (panel izquierdo) y escenarios 2, 4, 7 y 9 (panel derecho), considerando resultados sin proyectar ni descontar.

Las figuras 3.184-3.192 responden a los resultados obtenidos para los escenarios de riesgo sin descontar y muestran la distribución espacial de las consecuencias sobre la producción de servicios ecosistémicos proyectadas a los horizontes temporales establecidos. La tasa de aumento anual que se ha aplicado es la equivalente al VAB total por concejo. Se puede observar que los concejos que sufrirán mayores daños sobre la producción de servicios ecosistémicos son Muros de Nalón, que para el clima presente ya alcanza el 0.27% del VAB afectado (véanse las figuras 3.184 y 3.185) y para el escenario de 63.1 cm de aumento del nivel medio del mar combinado con el evento extremo de 500 años de periodo de retorno estará en torno al 1.05% (véase la figura 3.192). Para el escenario más pesimista, Coaña, Cudillero y Castropol asumirán porcentajes de afectación

del VAB total por concejo de 0.45%, 0.39% y 0.31%, respectivamente (véase la figura 3.192). Por otro lado, y para cualquiera de los escenarios de riesgo propuestos, los concejos de Avilés y Caravia sufrirán consecuencias sobre la producción de servicios ecosistémicos poco significativas.

Escenario 1.- CLIMA PRESENTE: Tr1=100, S0

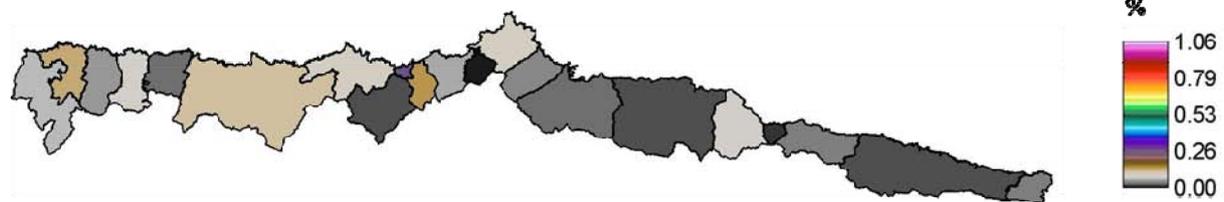


Figura 3.184. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E1: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el clima actual.

Escenario 2.- CLIMA PRESENTE: Tr2=500, S0



Figura 3.185. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E2: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno en el clima actual, considerando resultados descontados.

Escenario 3. HORIZONTE= 2050: Tr1=100 + SLR1= 0.24 m, S1

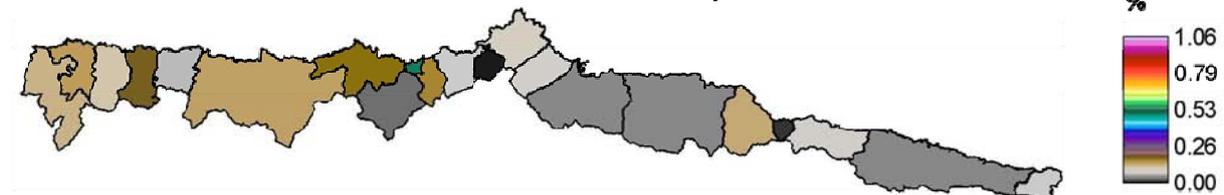


Figura 3.186. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E3: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, considerando resultados proyectados.

Escenario 4. HORIZONTE= 2050: Tr1=500 + SLR1= 0.24 m, S1



Figura 3.187. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E4: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, considerando resultados proyectados.

Escenario 5.- HORIZONTE= 2100: SLR4= 1 m, S2

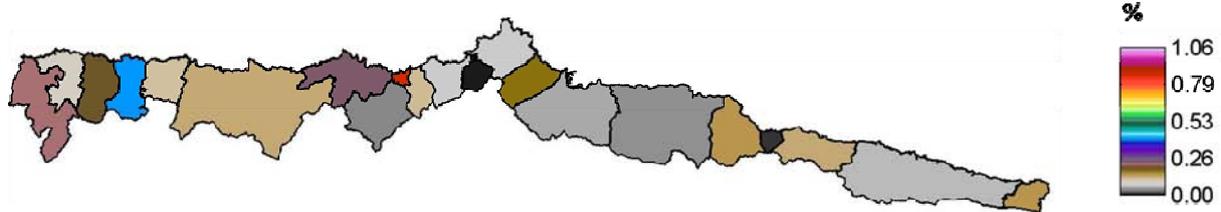


Figura 3.188. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E5: inundación permanente debida a un aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100, considerando resultados proyectados.

Escenario 6.- HORIZONTE= 2100: Tr1=100 + SLR2= 0.45 m, S2

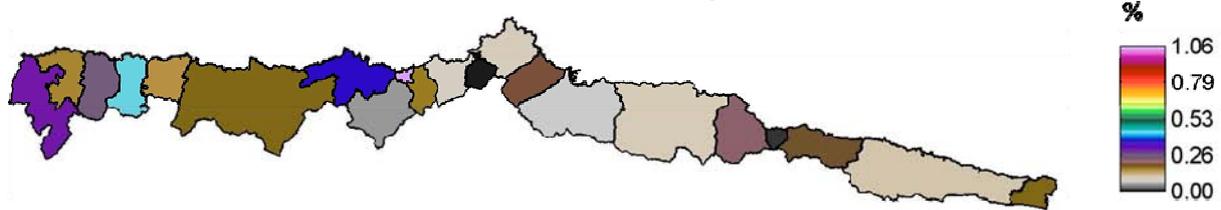


Figura 3.189. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E6: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio modificado localmente), considerando resultados proyectados.

Escenario 7.- HORIZONTE= 2100: Tr2=500 + SLR2= 0.45 m, S2

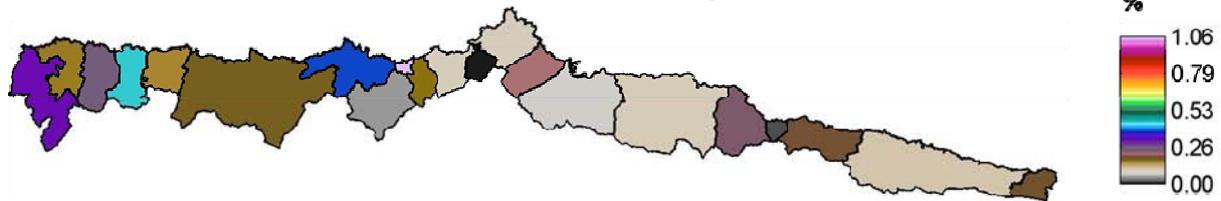


Figura 3.190. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E7: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio modificado localmente), considerando resultados proyectados.

Escenario 8.- HORIZONTE= 2100: Tr1=100 + SLR3= 0.65 m, S2

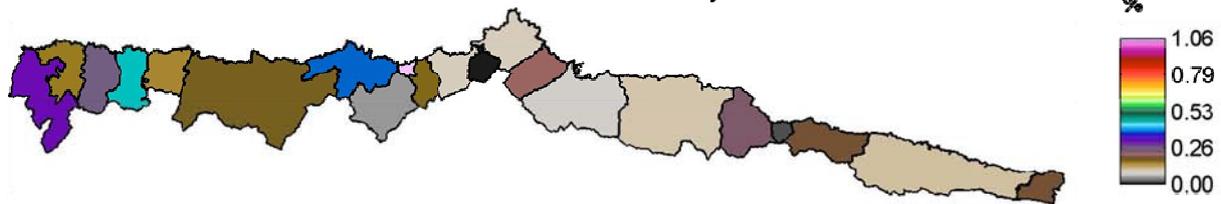


Figura 3.191. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E8: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio modificado localmente), considerando resultados proyectados.

Escenario 9.- HORIZONTE= 2100: Tr2=500 + SLR3= 0.65 m, S2

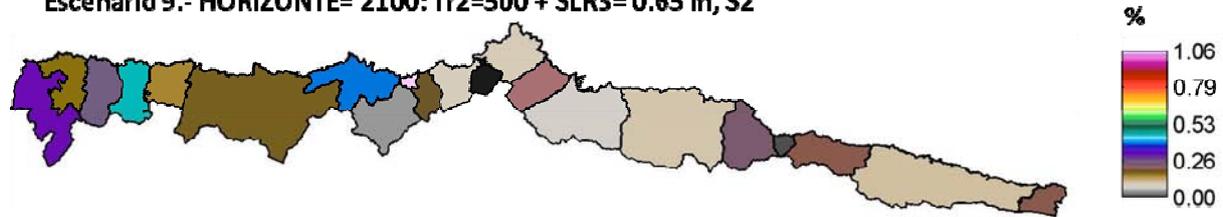


Figura 3.192. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E9: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio modificado localmente), considerando resultados proyectados.

La figura 3.193 muestra dos gráficos de barras con los porcentajes de VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos por concejo y escenario, agrupados de forma independiente los que cuentan con la contribución del evento extremo de 100 y de 500 años de periodo de retorno. En general, se puede apreciar que la diferencia entre las consecuencias derivadas de un cuantil de periodo de retorno u otro son poco apreciables a simple vista.

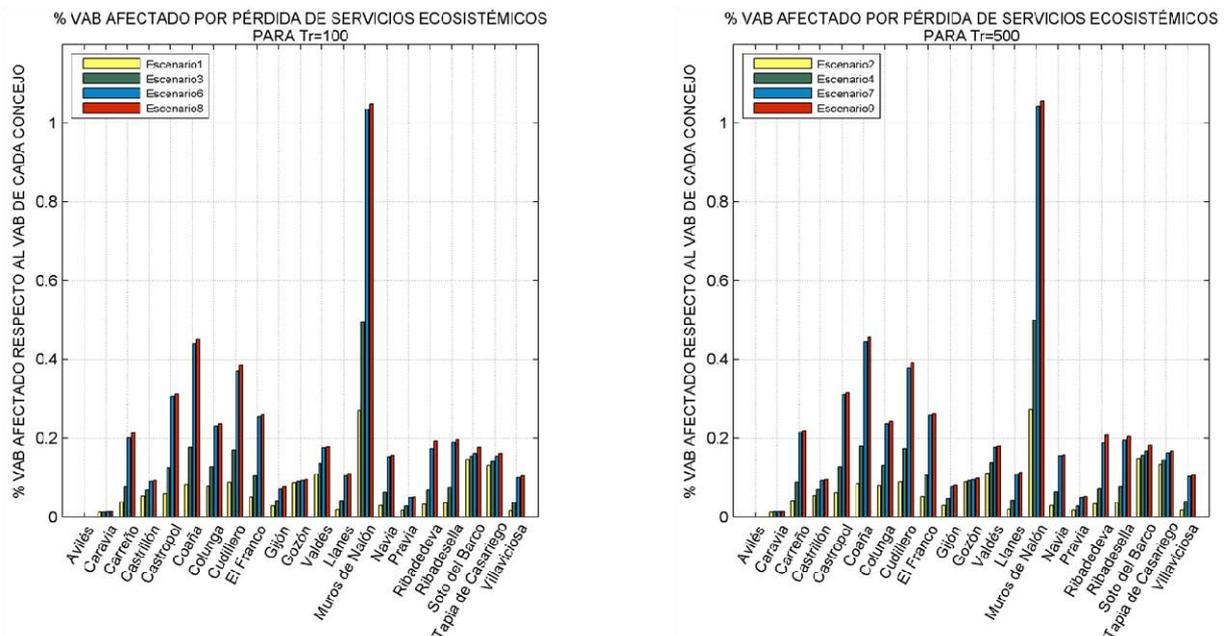


Figura 3.193. Porcentaje de VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos respecto al VAB total de cada concejo: escenarios 1, 3, 6 y 8 (panel izquierdo) y escenarios 2, 4, 7 y 9 (panel derecho), considerando resultados proyectados.

Finalmente, se muestra la distribución espacial de los resultados obtenidos derivados de los escenarios de riesgo proyectados. Análogamente a lo ocurrido en lo que respecta al cálculo del daño sobre el VAB agrícola e industrial descontado, e independientemente de que en este caso la tasa de crecimiento anual haya sido positiva en la mayoría de concejos (salvo en Avilés, caravia, Gozón y Soto del Barco, donde se ha asumido nula), se han obtenido algunos porcentajes de afección mayores en el presente que en el futuro. Esto ocurre en las ocasiones en las que, o bien la tasa de crecimiento es nula o bien menor que la posterior tasa de descuento implementada, y la extensión de los ecosistemas inundados para los distintos horizontes temporales no difiere excesivamente de la obtenida para el clima actual. En el caso de Muros de Nalón las consecuencias

económicas serán ligeramente más elevadas en el presente que a medio plazo pero los mayores daños se producen a 2100 (véanse las figuras 3.194-3.202) alcanzando para el escenario más pesimista el 0.43% del VAB afectado respecto al VAB total del concejo (véase la figura 3.202).

Escenario 1.- CLIMA PRESENTE: Tr1=100, S0

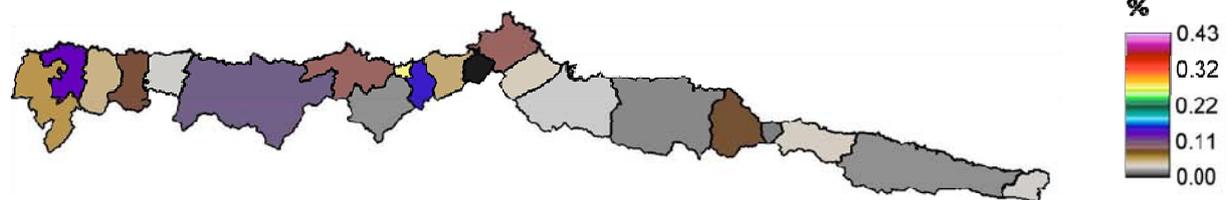


Figura 3.194. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E1: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el clima actual.

Escenario 2.- CLIMA PRESENTE: Tr2=500, S0

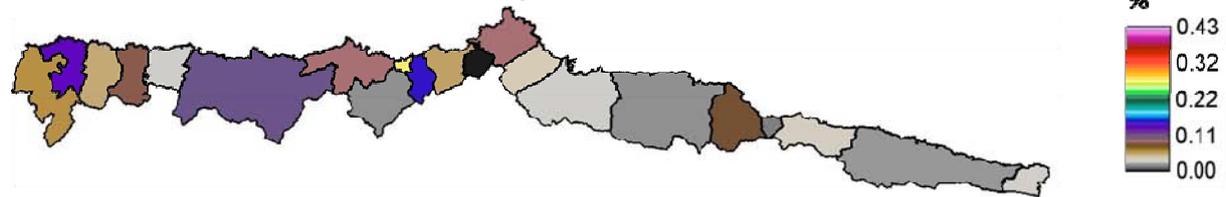


Figura 3.195. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E2: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno en el clima actual, considerando resultados descontados.

Escenario 3.- HORIZONTE= 2050: Tr1=100 + SLR1= 0.24 m, S1 descontado

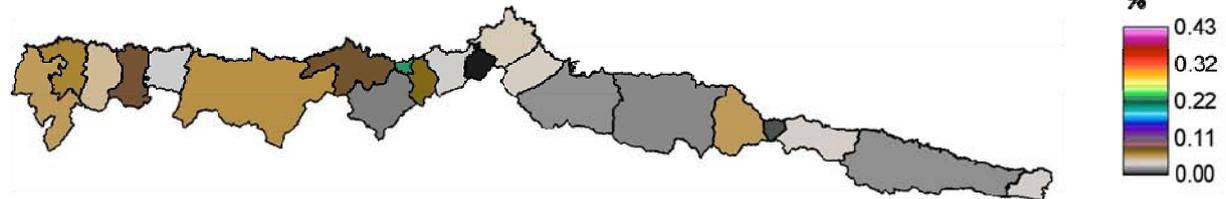


Figura 3.196. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E3: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, considerando resultados descontados.

Escenario 4.- HORIZONTE= 2050: Tr1=500 + SLR1= 0.24 m, S1 descontado



Figura 3.197. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E4: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050, considerando resultados descontados.

Escenario 5.- HORIZONTE= 2100: SLR4= 1 m, S2 descontado



Figura 3.198. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E5: inundación permanente debida a un aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100, considerando resultados descontados.

Escenario 6.- HORIZONTE= 2100: Tr1=100 + SLR2= 0.45 m, S2 descontado

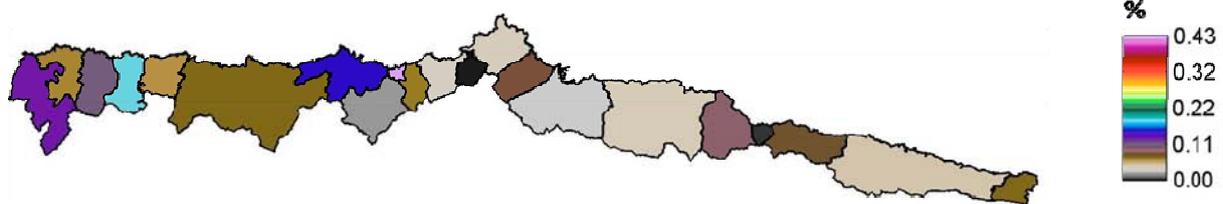


Figura 3.199. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E6: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio modificado localmente), considerando resultados proyectados.

Escenario 7.- HORIZONTE= 2100: Tr2=500 + SLR2= 0.45 m, S2 descontado

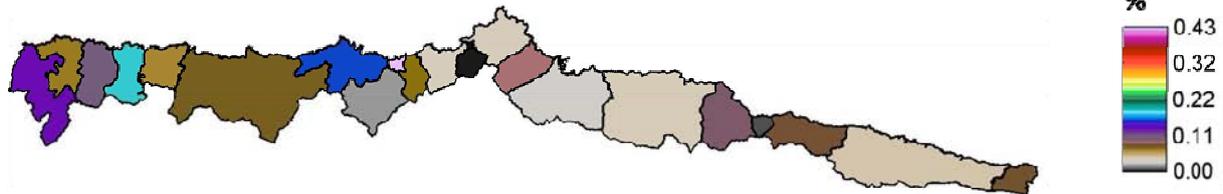


Figura 3.200. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E7: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.45 m a 2100 (valor medio modificado localmente), considerando resultados proyectados.

Escenario 8.- HORIZONTE= 2100: Tr1=100 + SLR3= 0.65 m, S2 descontado

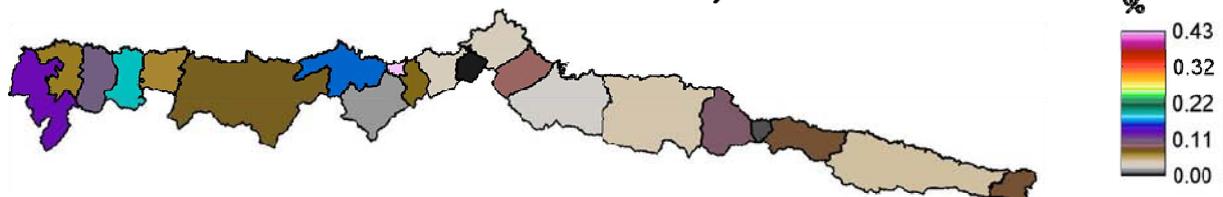


Figura 3.201. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E8: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio modificado localmente), considerando resultados proyectados.

Escenario 9.- HORIZONTE= 2100: Tr2=500 + SLR3= 0.65 m, S2 descontado

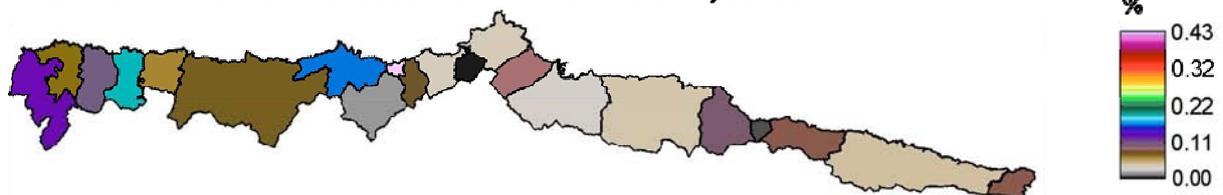


Figura 3.202. VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos para E9: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio modificado localmente), considerando resultados proyectados.

La figura 3.203 presenta los porcentajes de VAB afectado por la pérdida de servicios ecosistémicos respecto al VAB total de cada concejo del litoral asturiano. Como en casos anteriores, se han considerado los escenarios vinculados a los eventos de 100 y 500 años de periodo de retorno separadamente.

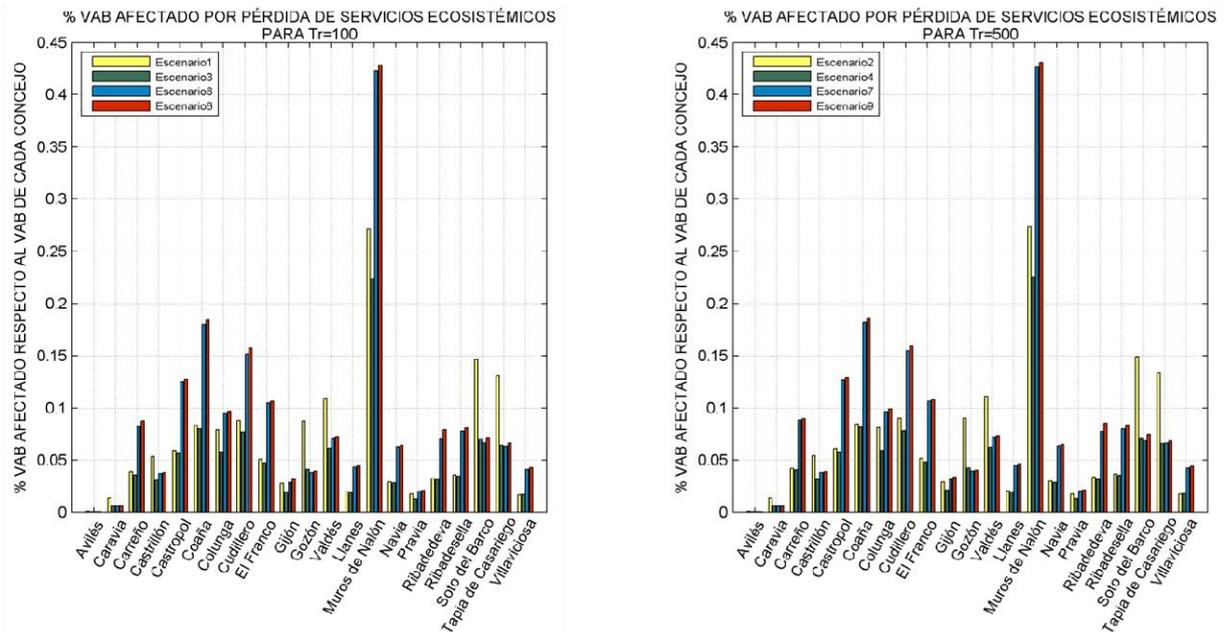


Figura 3.203. Porcentaje de VAB afectado por pérdida de servicios ecosistémicos respecto al VAB total de cada concejo: escenarios 1, 3, 6 y 8 (panel izquierdo) y escenarios 2, 4, 7 y 9 (panel derecho), considerando resultados descontados.

3.4.3. Riesgo sobre el turismo

El Principado Asturias cuenta con más de trescientos cuarenta y cinco kilómetros de playa a lo largo de todo su litoral, lo que ha hecho que gran parte de su desarrollo socioeconómico haya estado siempre ligado al mar. Por otro lado, las poblaciones costeras han protagonizado durante la segunda mitad del siglo pasado los mayores flujos migratorios estacionales de la historia. Esta continua movilización ha generado una intensificación de los usos residenciales y las actividades relativas al sector industrial y de servicios alrededor de las playas, lo que se ha visto potenciado por el turismo, ya sea estacional o de larga temporada. Sin embargo, ya en la actualidad estas áreas se encuentran bajo un proceso generalizado de erosión, provocado en ocasiones por la acción humana mediante la alteración de la dinámica sedimentaria y gravemente potenciado por el cambio climático, especialmente por el aumento del nivel medio del mar.

Cuando se pierden metros cuadrado de playa no sólo se pierde el servicio ecosistémico que ofrecen sino que también se pierde su servicio recreativo y, consecuentemente, el atractivo turístico de la zona disminuye. La estimación contable del tiempo recreativo depende del tipo de playa (urbana, situada en un área de veraneo, aislada), de la calidad de sus servicios y entorno, de su orientación y accesos, entre otros parámetros. La figura 3.204 muestra, para cada playa y aumento del nivel medio del mar propuesto los millones de euros de uso recreativo que llegarán a perderse si no se actúa al respecto.

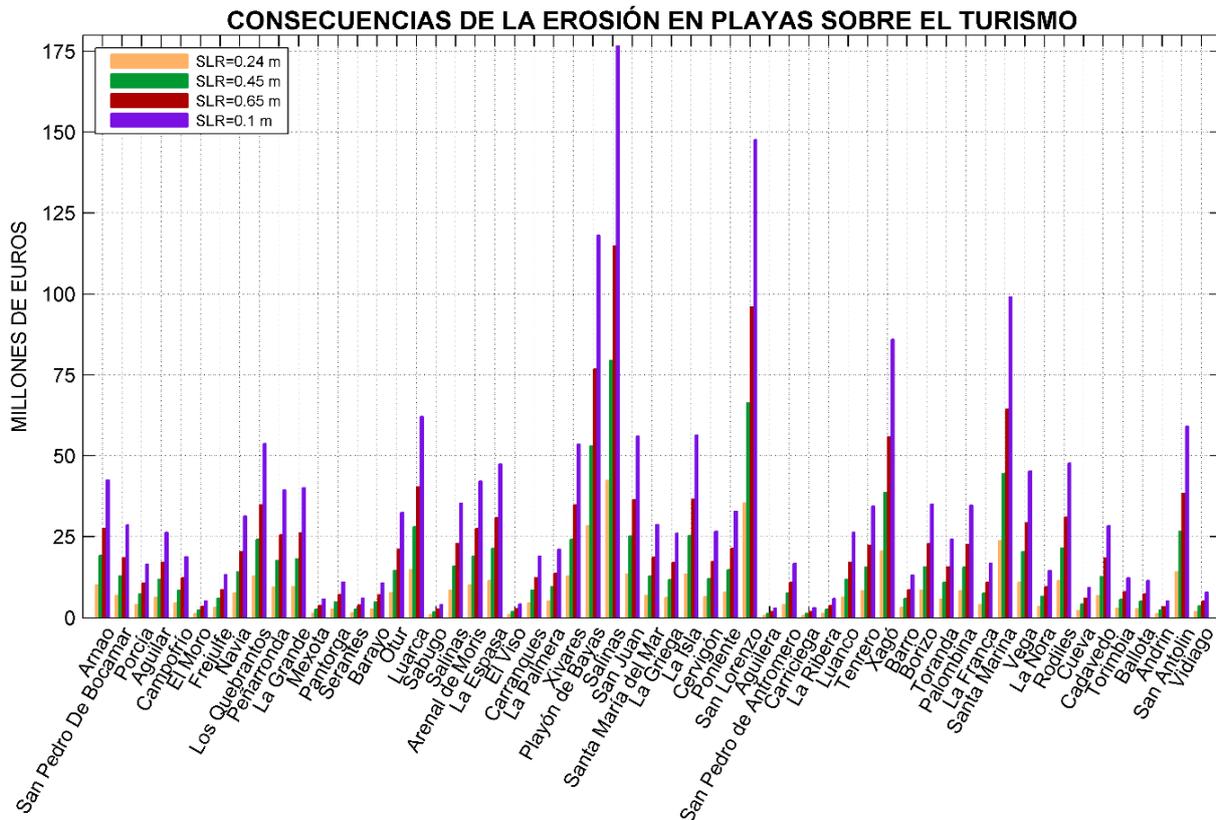


Figura 3.204. Millones de euros de pérdida potencial de uso recreativo en las playas asturianas.

Por sus características y en función del área potencialmente perdida por el aumento del nivel medio del mar, las playas de Salinas y San Lorenzo son las que sufrirán los mayores daños económicos alcanzando, para el escenario más pesimista, 175 y 150 millones de euros, respectivamente. Les siguen el Playón de Bayas, Santa Marina y Xagó.

La figura 3.205 muestra los resultados agregado a nivel de concejo. Castrillón, que alberga las playas de Salinas, San Juan y el Playón de Bayas entre otras, alcanza, para el escenario de 1 m de aumento de nivel, pérdidas de más de 350 millones de euros. Si no se actúa al respecto, Gijón, Llanes, Valdés y Gozón sufrirán consecuencias en torno a los 200 millones de euros.

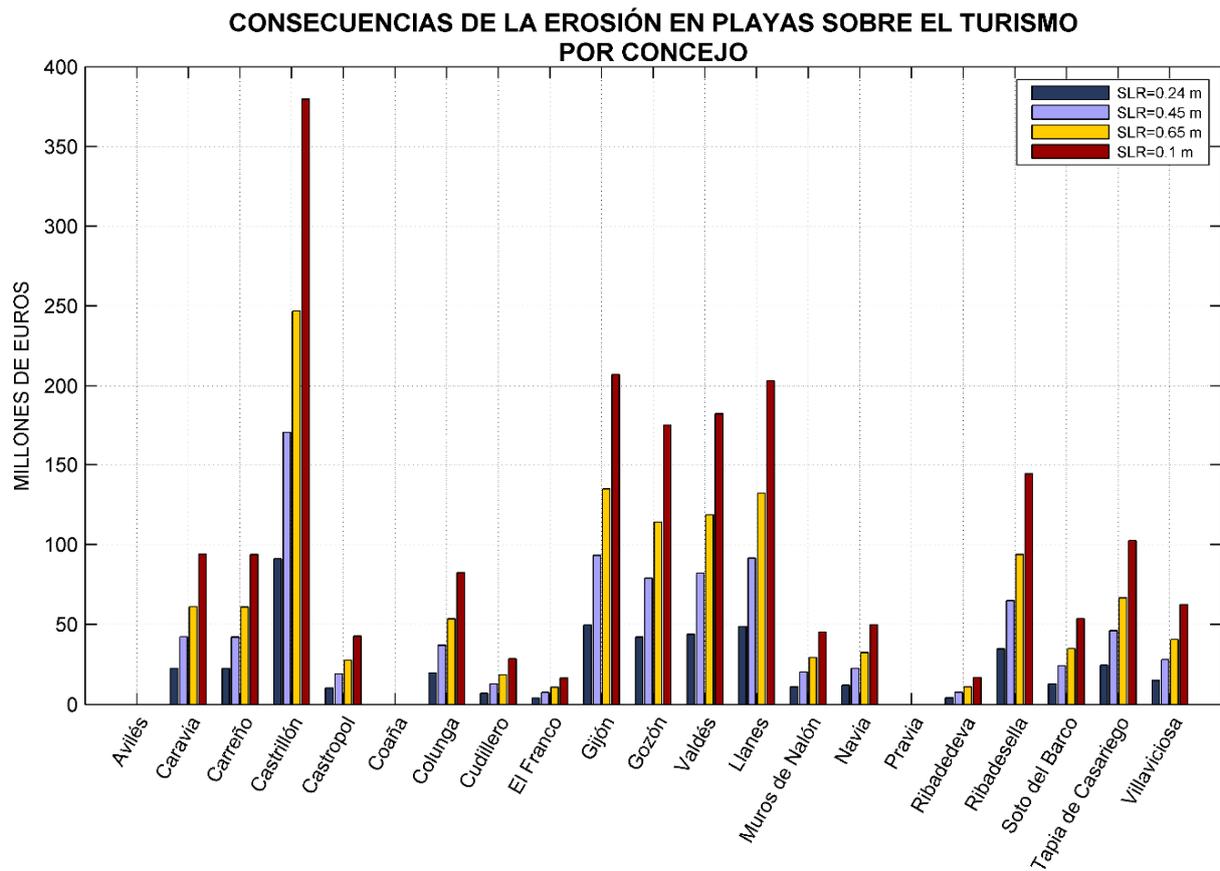


Figura 3.205. Millones de euros de pérdida potencial de uso recreativo agregados a nivel de concejo.

A continuación, se presentan las figuras 3.206-3.239 que muestran la síntesis de los resultados obtenidos en la evaluación del riesgo sobre el sistema socioeconómico.

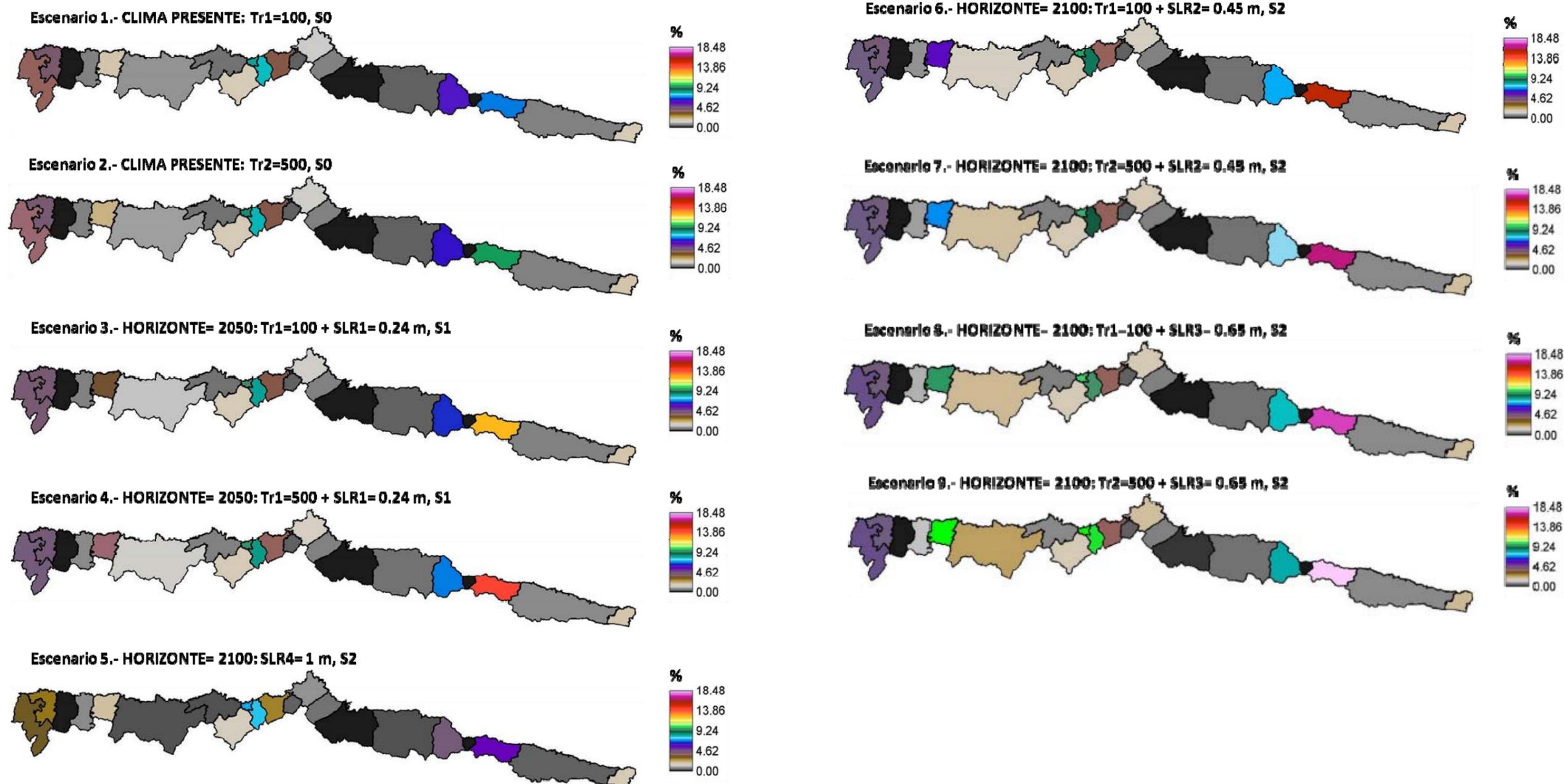


Figura 3.206. Distribución espacial de las consecuencias sobre la población derivadas de los escenarios de riesgo propuestos. Porcentaje respecto al censo de población de 2010.



Figura 3.207. Distribución espacial de los concejos costeros del litoral asturiano.

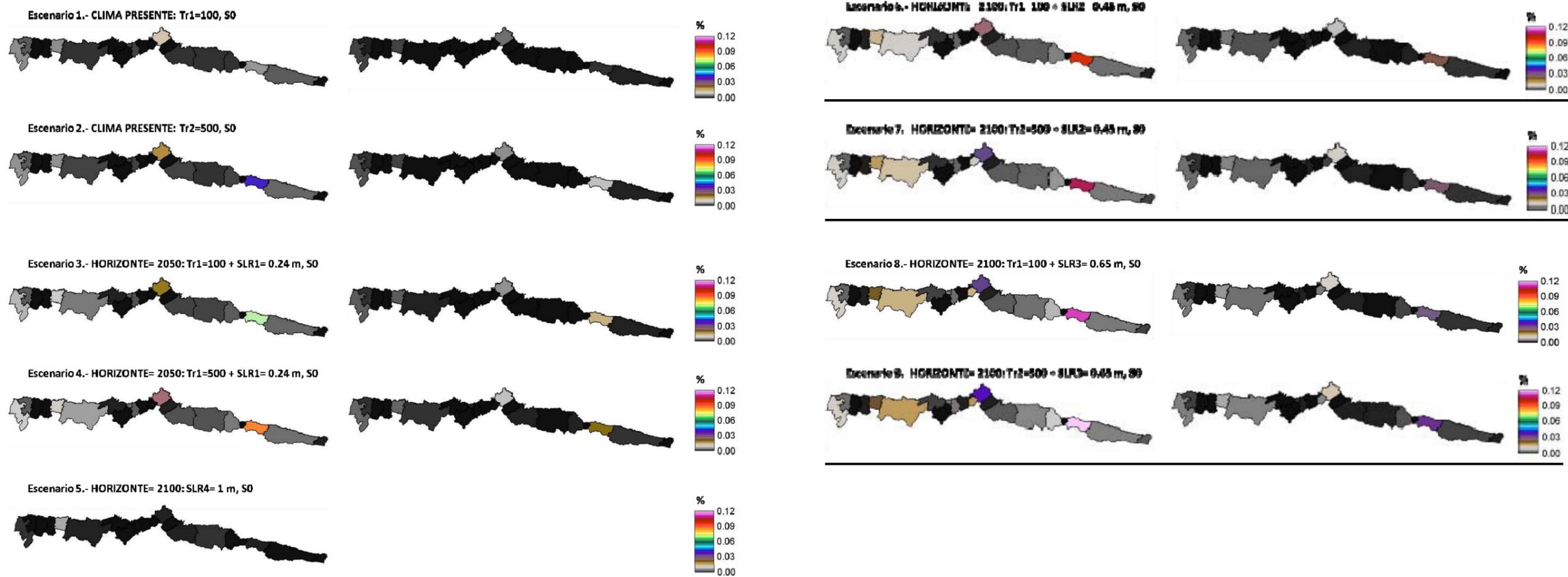


Figura 3.208. Distribución espacial de las consecuencias sobre el stock de capital de vivienda - continente. Resultados sin proyectar ni descontar. Porcentaje respecto al stock de capital de vivienda del Principado de Asturias, de 2011.

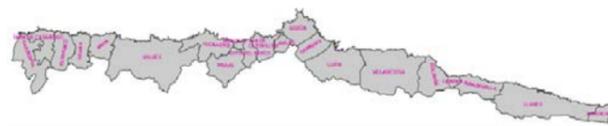


Figura 3.209. Distribución espacial de los concejos costeros del litoral asturiano.

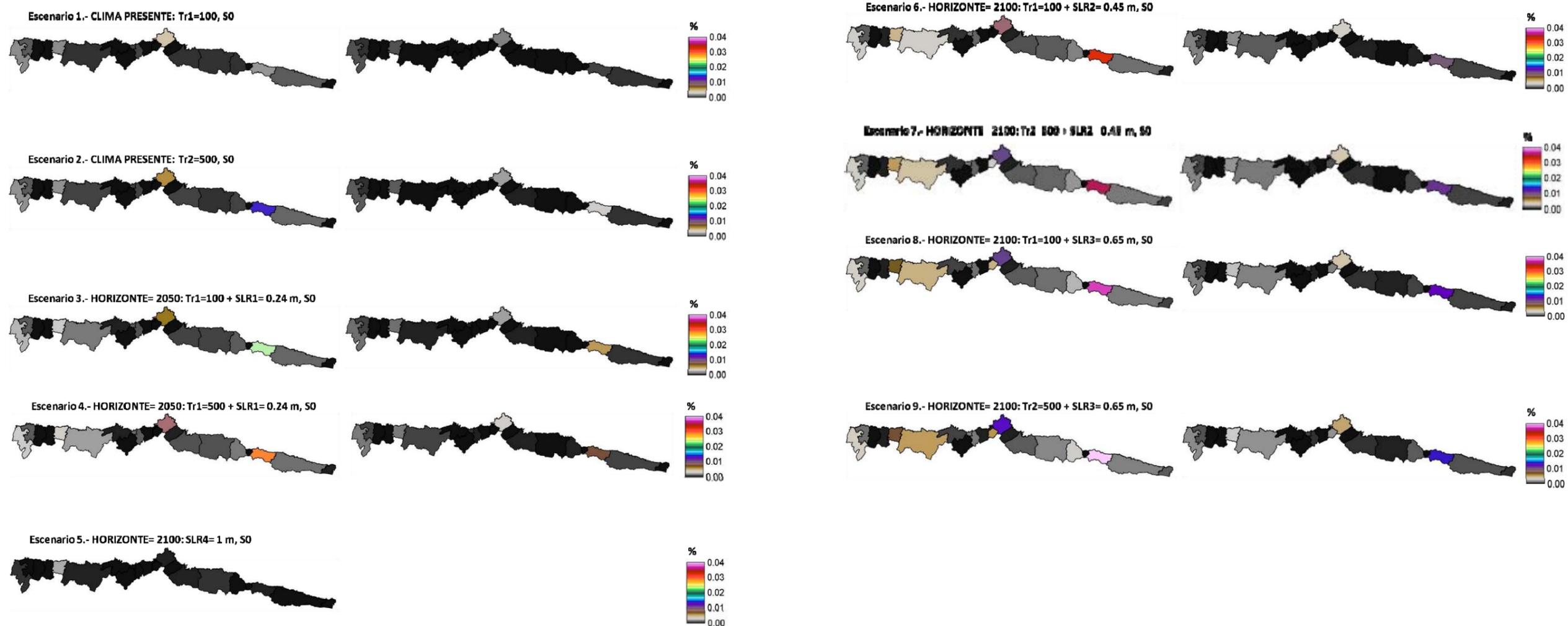


Figura 3.210. Distribución espacial de las consecuencias sobre el stock de capital de vivienda - contenido. Resultados sin proyectar ni descontar. Porcentaje respecto al stock de capital de vivienda del Principado de Asturias, de 2011.



Figura 3.211. Distribución espacial de los concejos costeros del litoral asturiano.

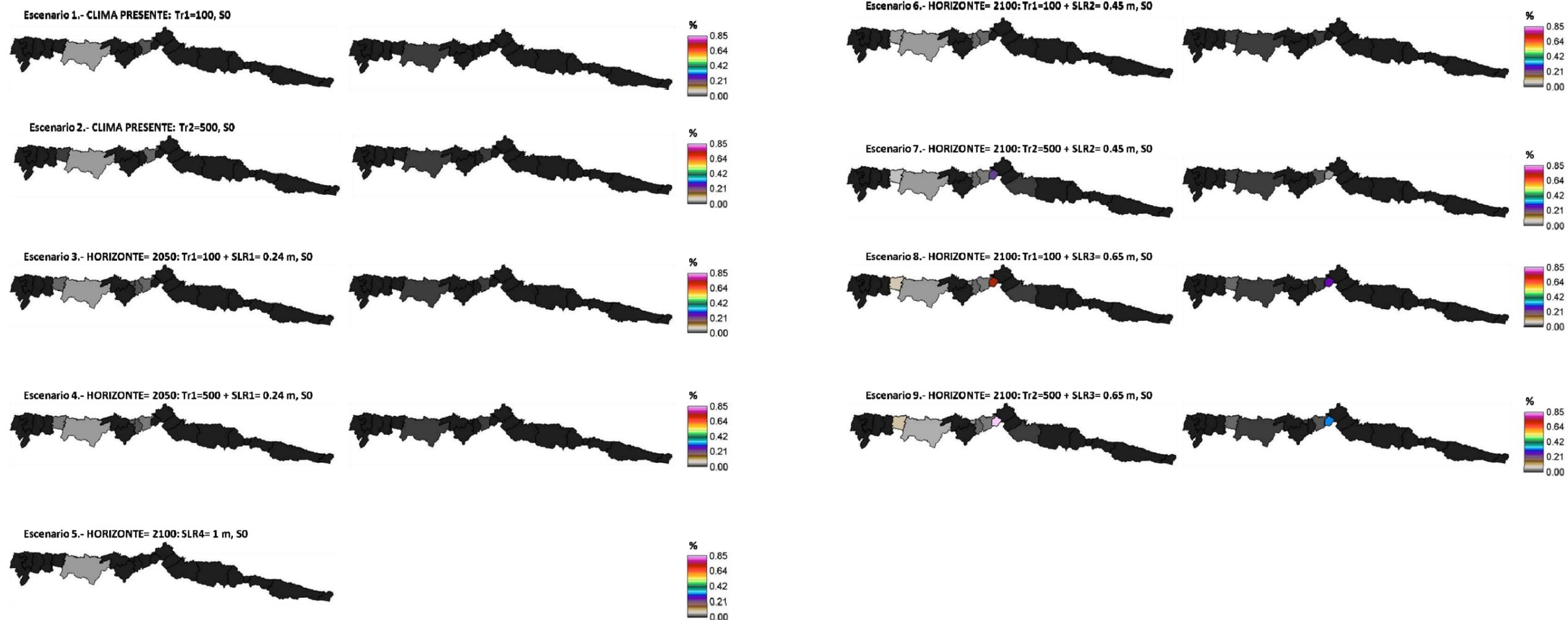


Figura 3.212. Distribución espacial de las consecuencias sobre el stock de capital industrial. Resultados sin proyectar ni descontar. Porcentaje respecto al stock de capital industrial del Principado de Asturias, de 2011.



Figura 3.213. Distribución espacial de los concejos costeros del litoral asturiano.

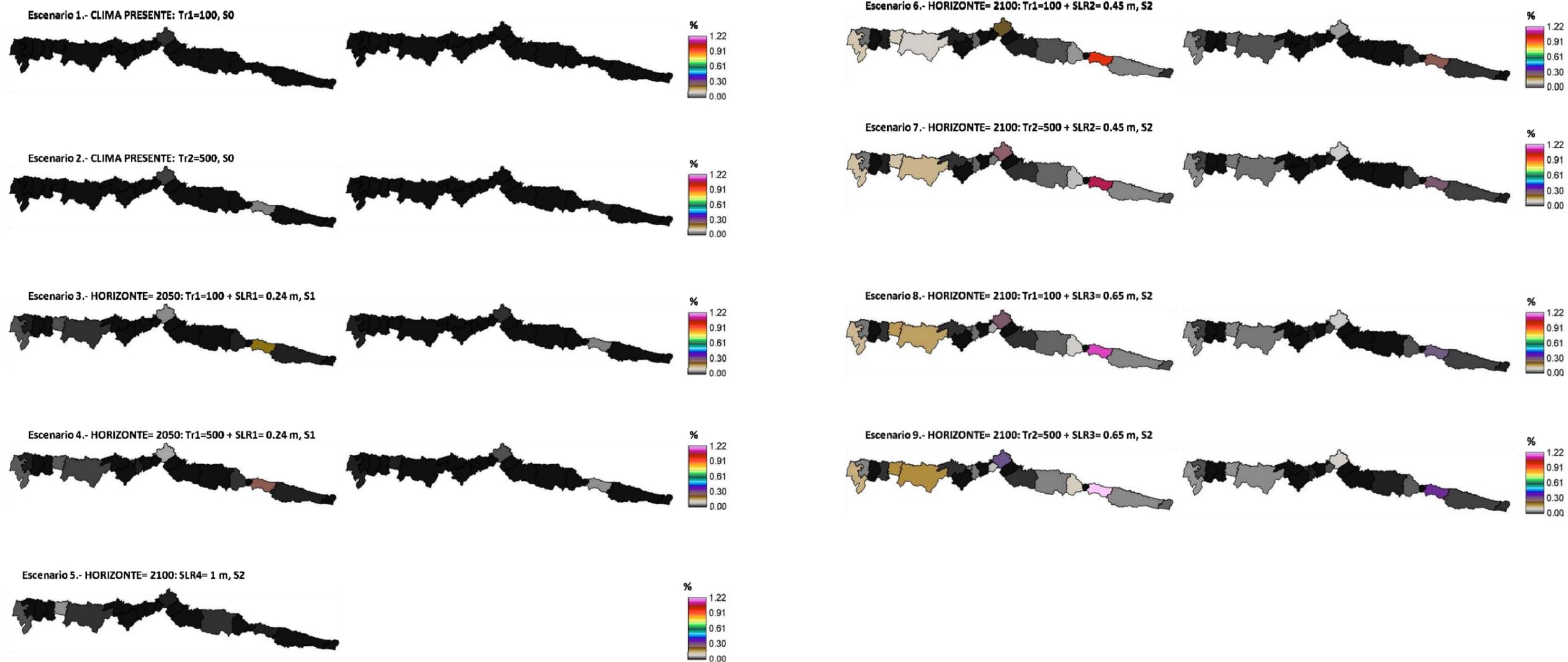


Figura 3.214. Distribución espacial de las consecuencias sobre el stock de capital de vivienda - continente. Resultados proyectados sin descontar. Porcentaje respecto al stock de capital de vivienda del Principado de Asturias, de 2011.

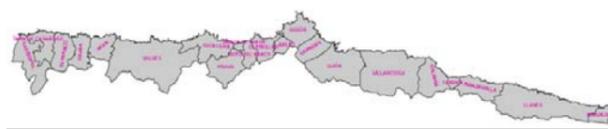


Figura 3.215. Distribución espacial de los concejos costeros del litoral asturiano.

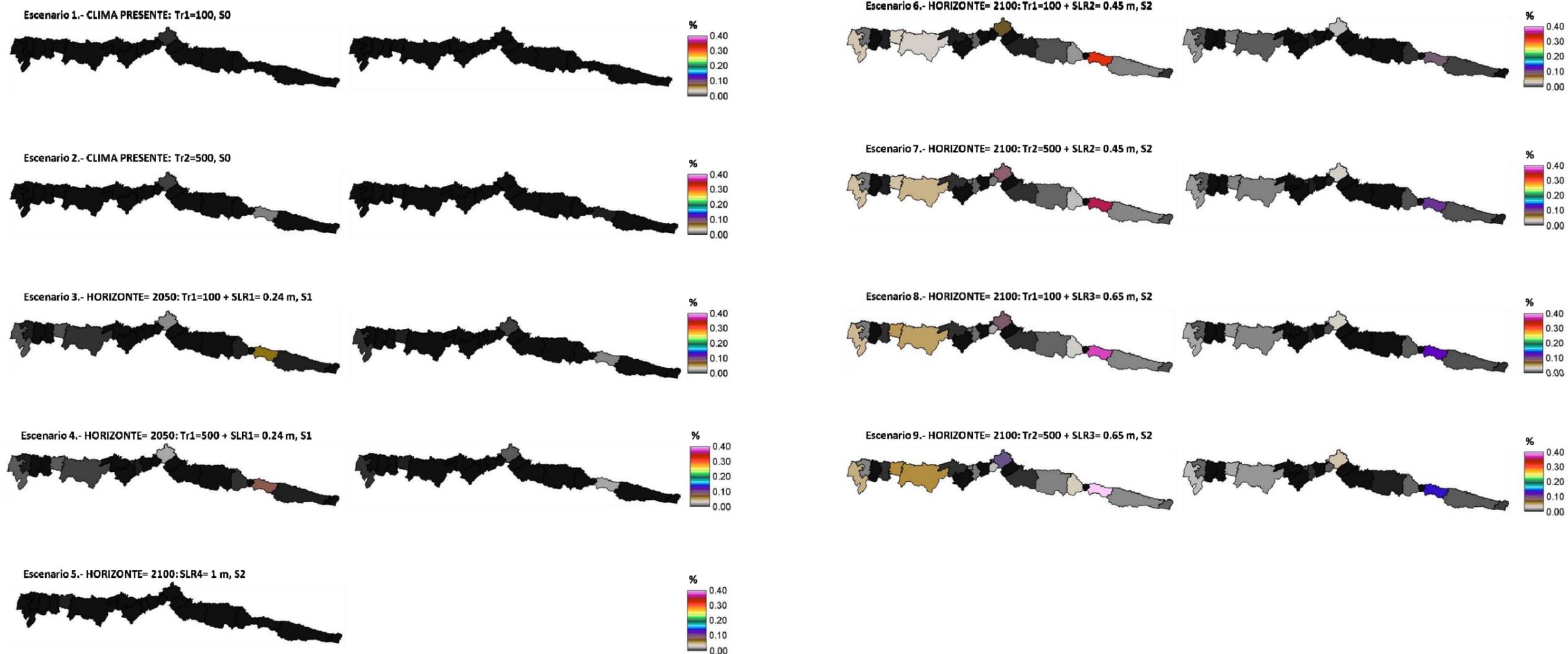


Figura 3.216. Distribución espacial de las consecuencias sobre el stock de capital de vivienda - contenido. Resultados proyectados sin descontar. Porcentaje respecto al stock de capital de vivienda del Principado de Asturias, de 2011.



Figura 3.217. Distribución espacial de los concejos costeros del litoral asturiano.

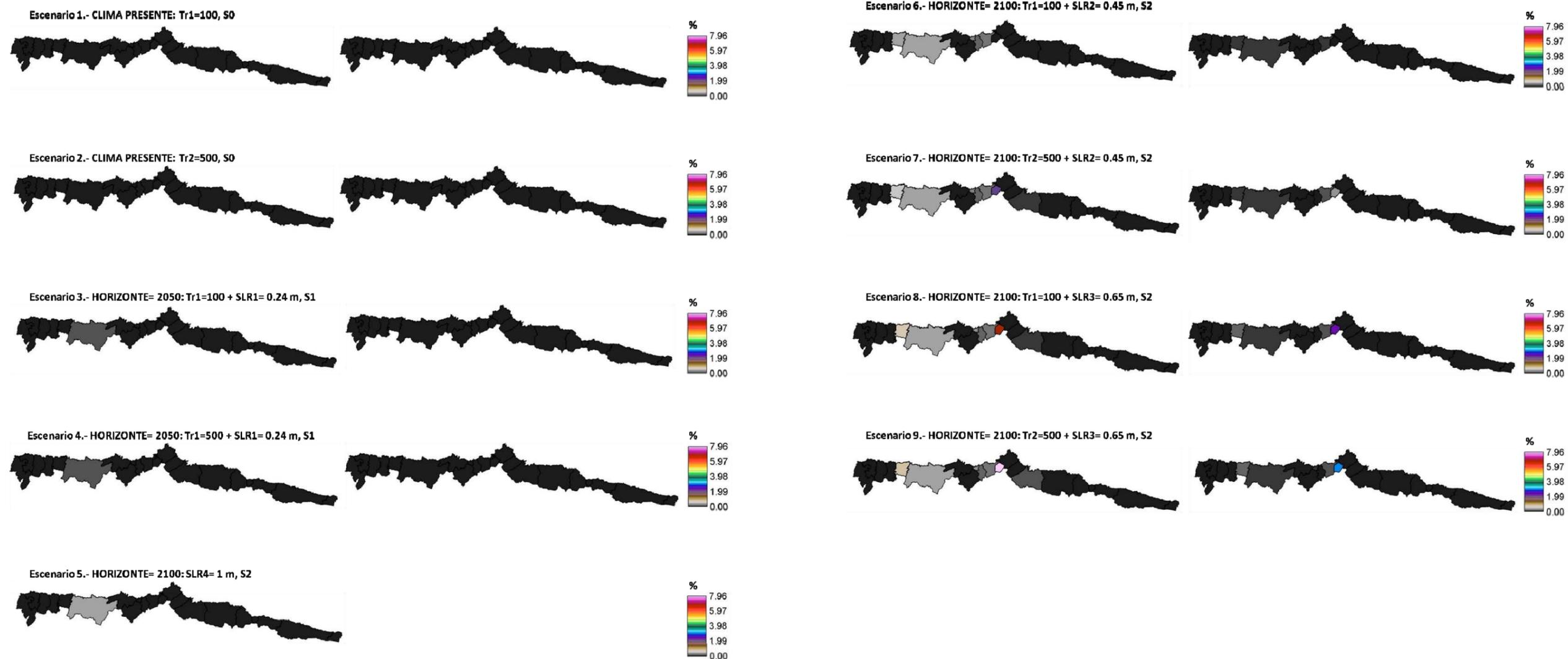


Figura 3.218. Distribución espacial de las consecuencias sobre el stock de capital industrial. Resultados proyectados sin descontar. Porcentaje respecto al stock de capital industrial del Principado de Asturias, de 2011.



Figura 3.219. Distribución espacial de los concejos costeros del litoral asturiano.

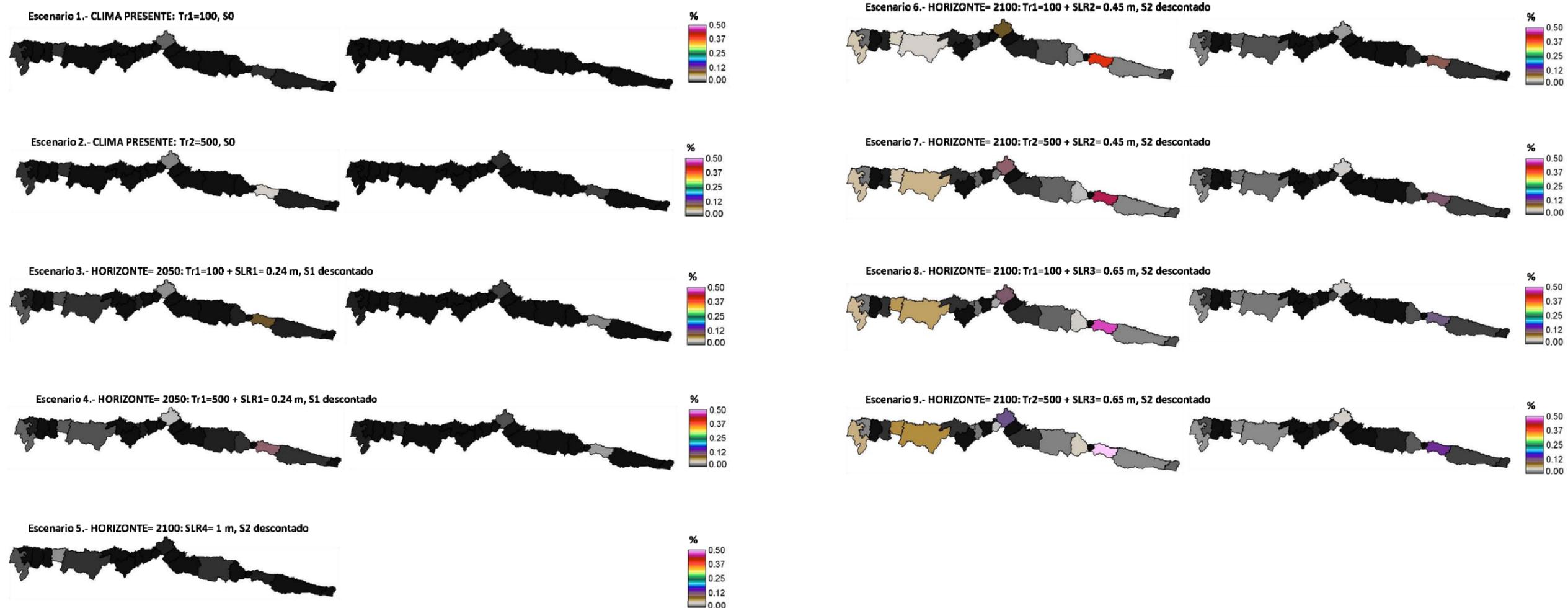


Figura 3.220. Distribución espacial de las consecuencias sobre el stock de capital de vivienda - continente. Resultados proyectados y descontados. Porcentaje respecto al stock de capital de vivienda del Principado de Asturias, de 2011.

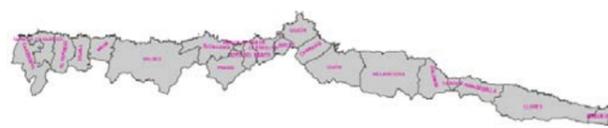
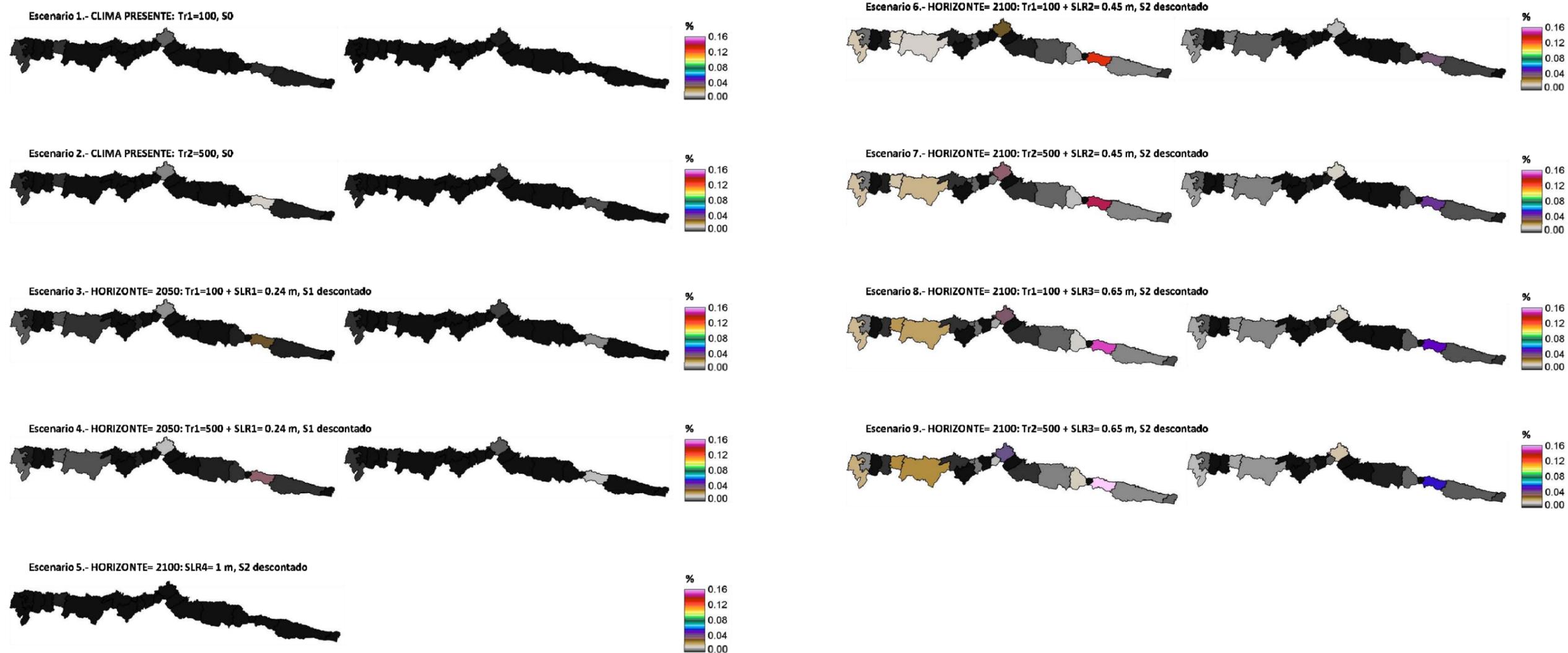


Figura 3.221. Distribución espacial de los concejos costeros del litoral asturiano.



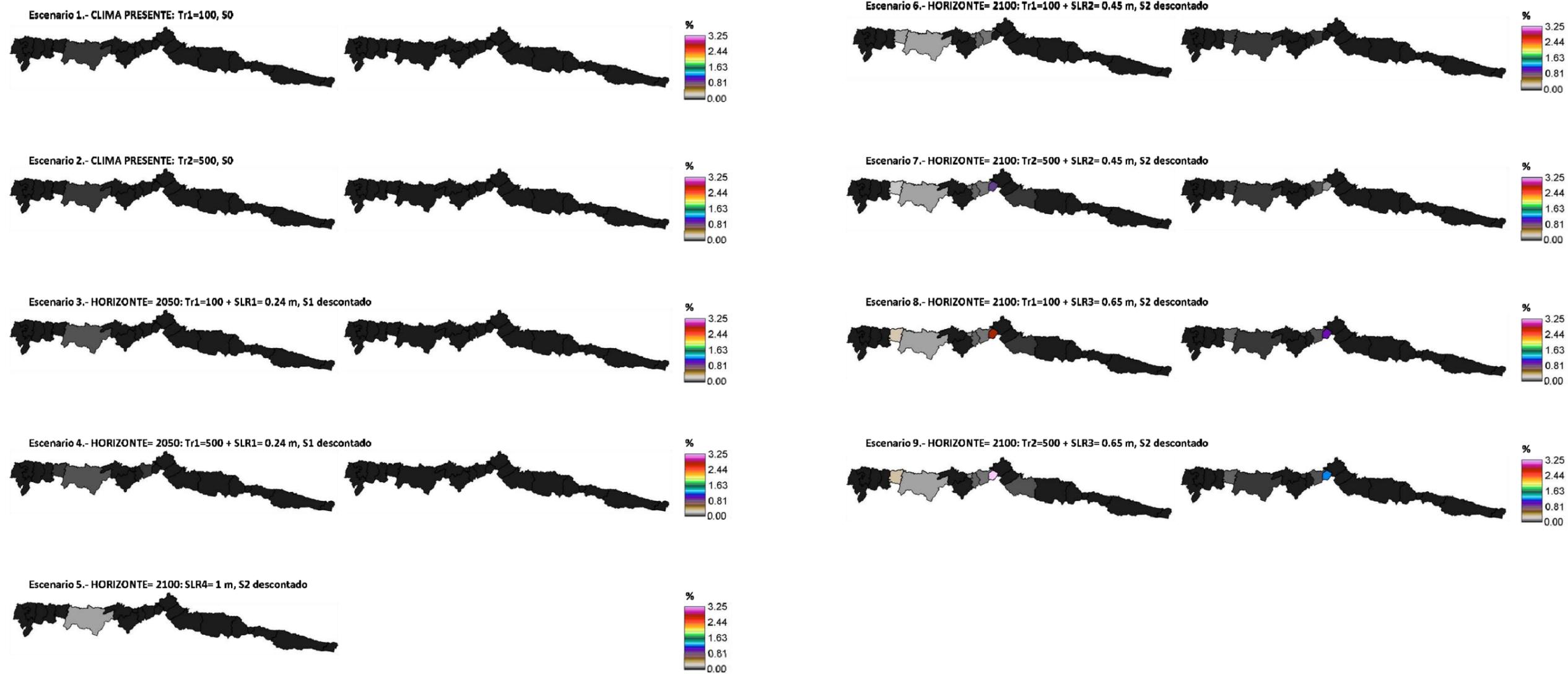


Figura 3.224. Distribución espacial de las consecuencias sobre el stock de capital industrial. Resultados proyectados y descontados. Porcentaje respecto al stock de capital industrial del Principado de Asturias, de 2011.

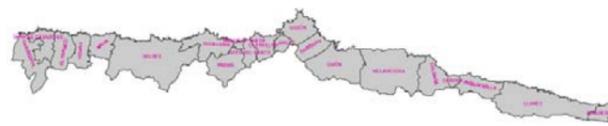


Figura 3.225. Distribución espacial de los concejos costeros del litoral asturiano.

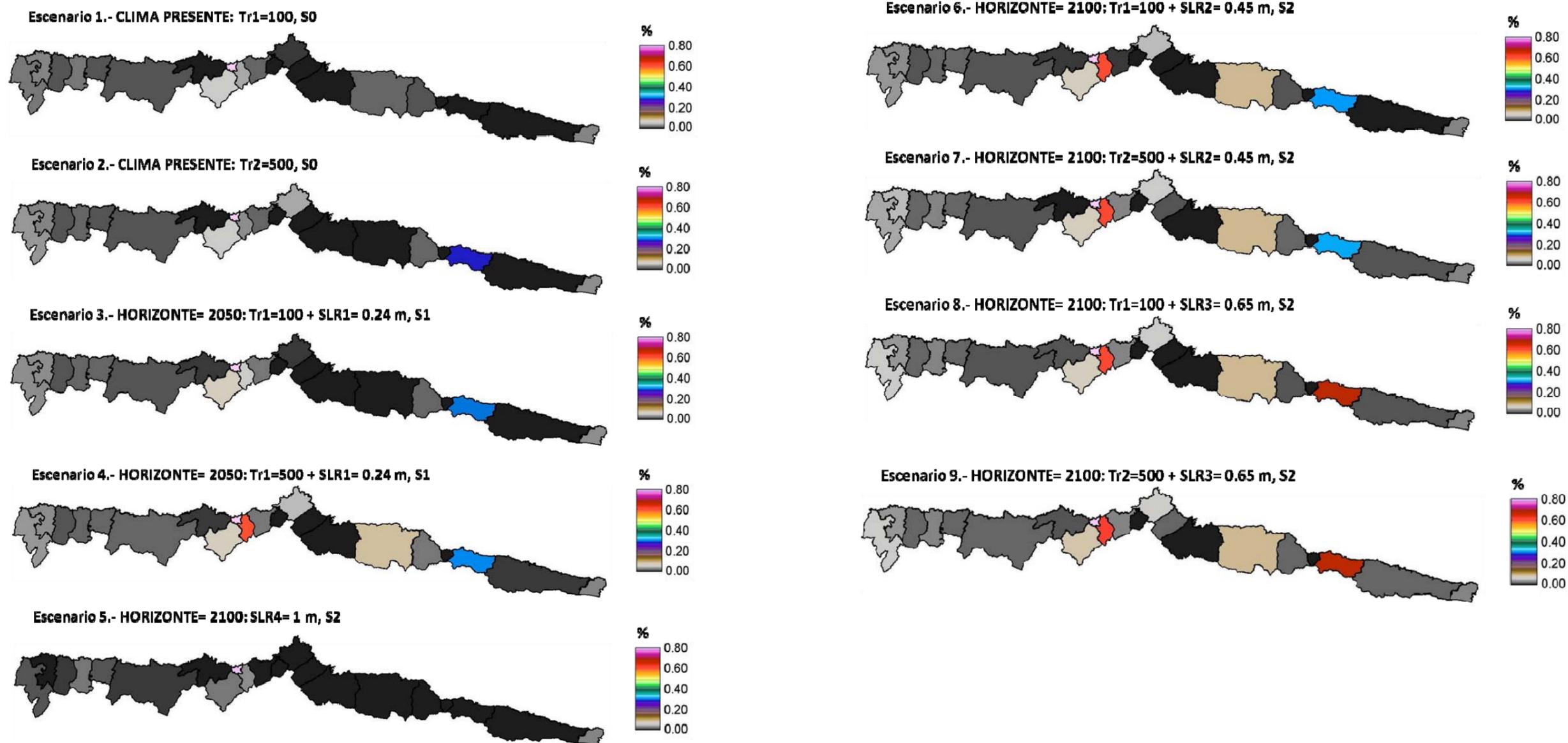


Figura 3.226. Distribución espacial de las consecuencias sobre el VAB agrícola. Resultados proyectados (tasa de crecimiento anual nula) sin descontar. Porcentaje respecto al VAB agrícola de cada concejo, de 2010.



Figura 3.227. Distribución espacial de los concejos costeros del litoral asturiano.

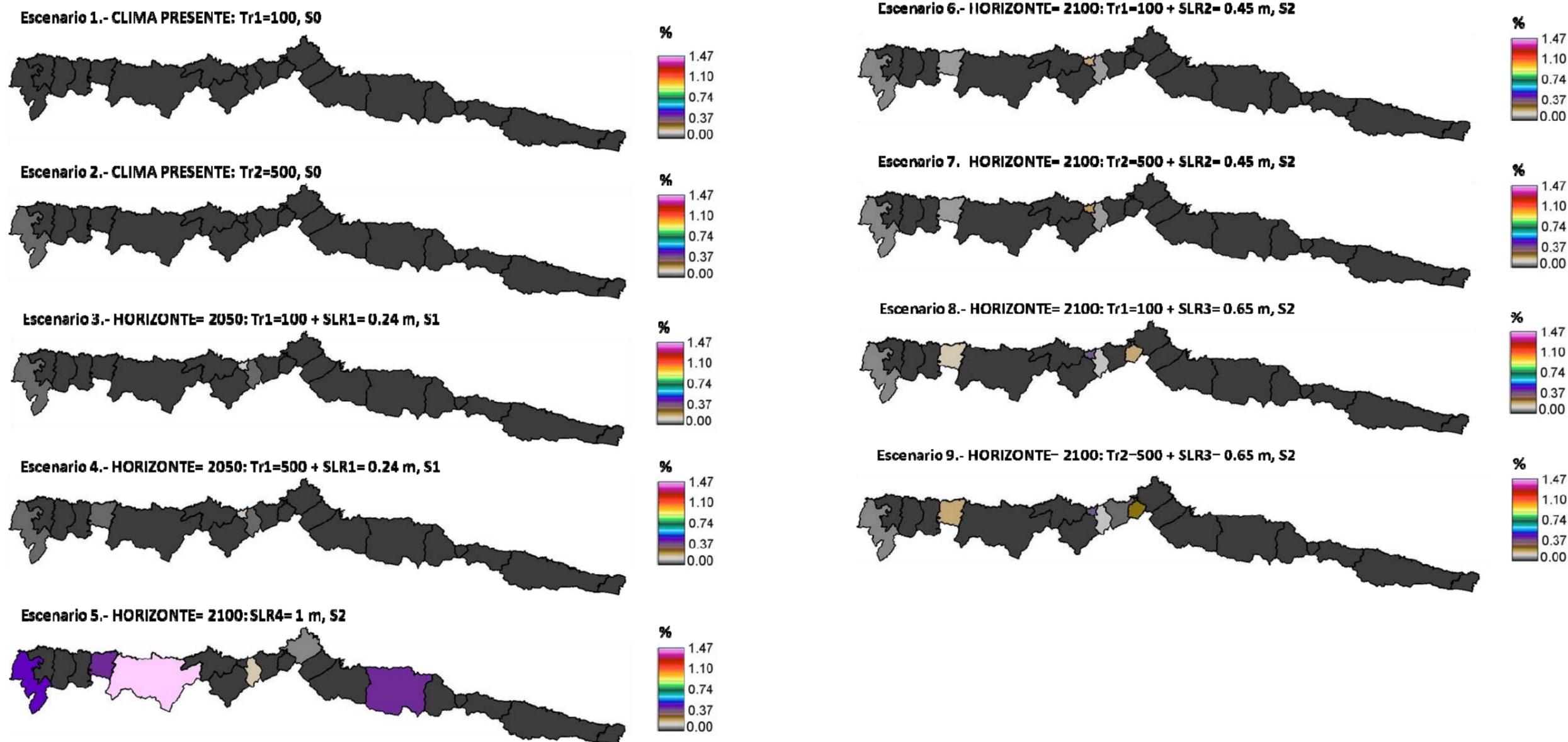


Figura 3.228. Distribución espacial de las consecuencias sobre el VAB industrial. Resultados proyectados (tasa de crecimiento anual nula) sin descontar. Porcentaje respecto al VAB industrial de cada concejo, de 2010.



Figura 3.229. Distribución espacial de los concejos costeros del litoral asturiano.

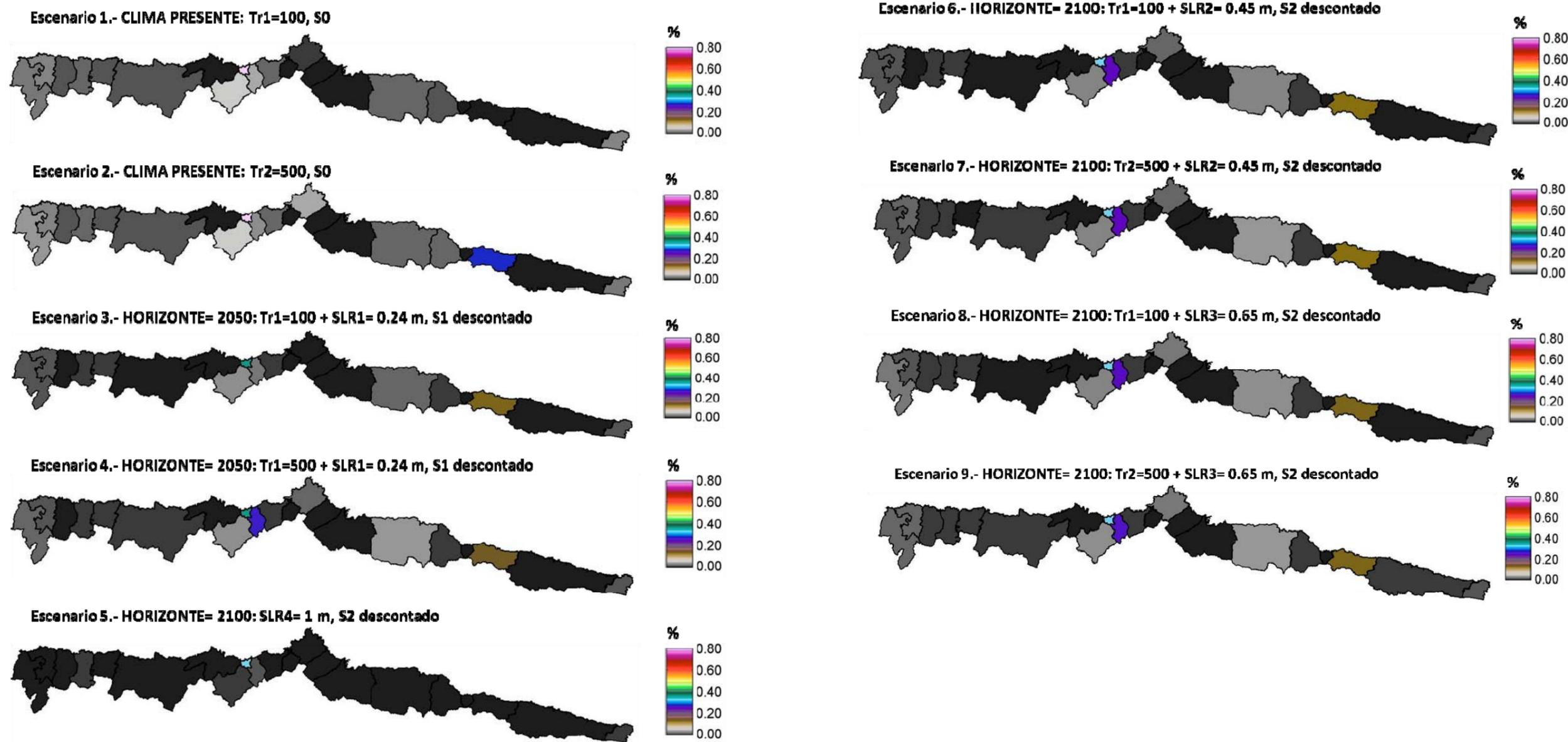


Figura 3.230. Distribución espacial de las consecuencias sobre el VAB agrícola. Resultados proyectados (tasa de crecimiento anual nula) y descontados. Porcentaje respecto al VAB agrícola de cada concejo, de 2010.

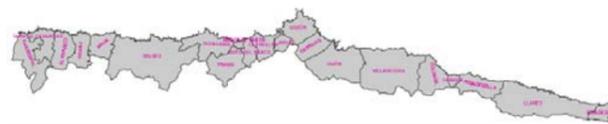


Figura 3.231. Distribución espacial de los concejos costeros del litoral asturiano.

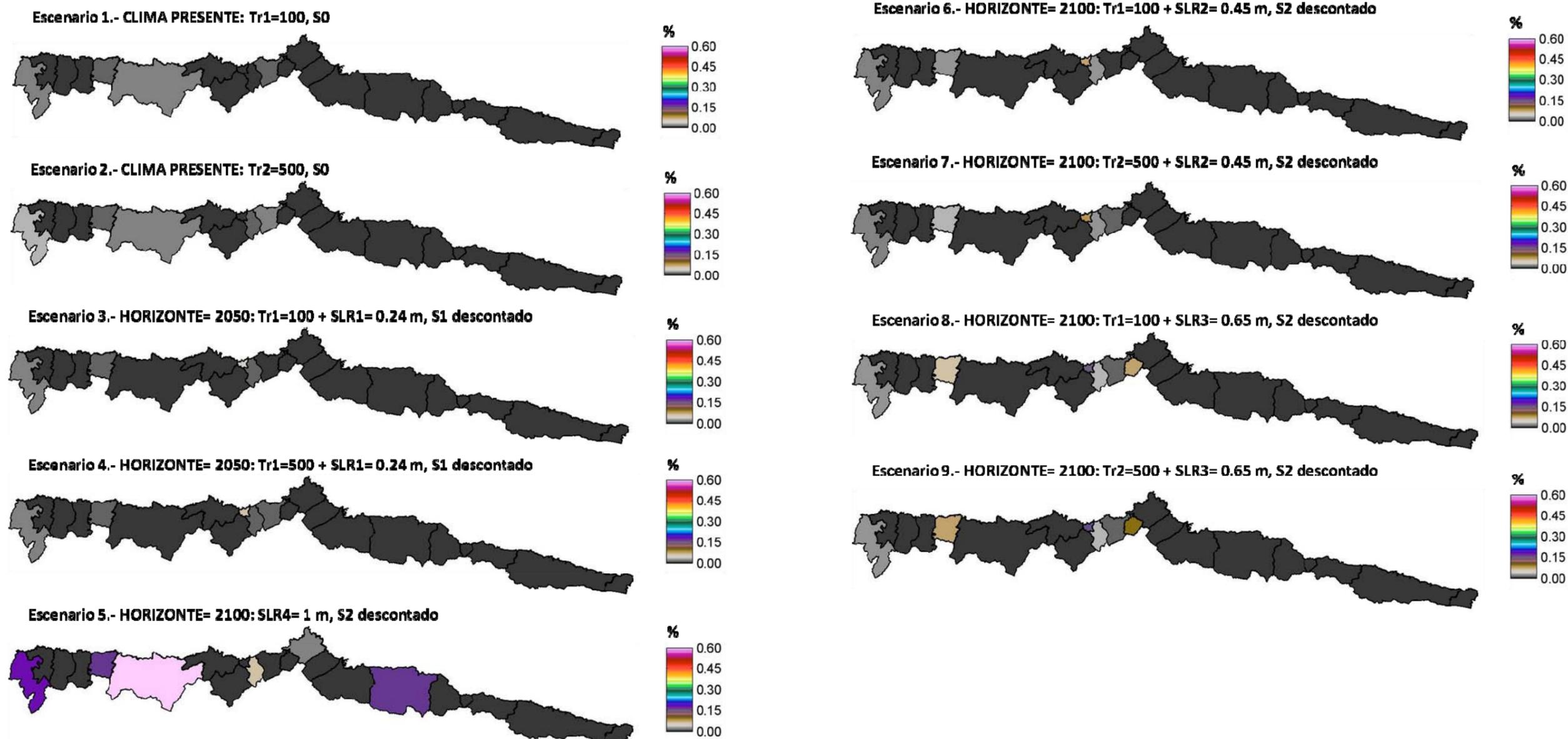


Figura 3.232. Distribución espacial de las consecuencias sobre el VAB industrial. Resultados proyectados (tasa de crecimiento anual nula) y descontados. Porcentaje respecto al VAB industrial de cada concejo, de 2010.



Figura 3.233. Distribución espacial de los concejos costeros del litoral asturiano.

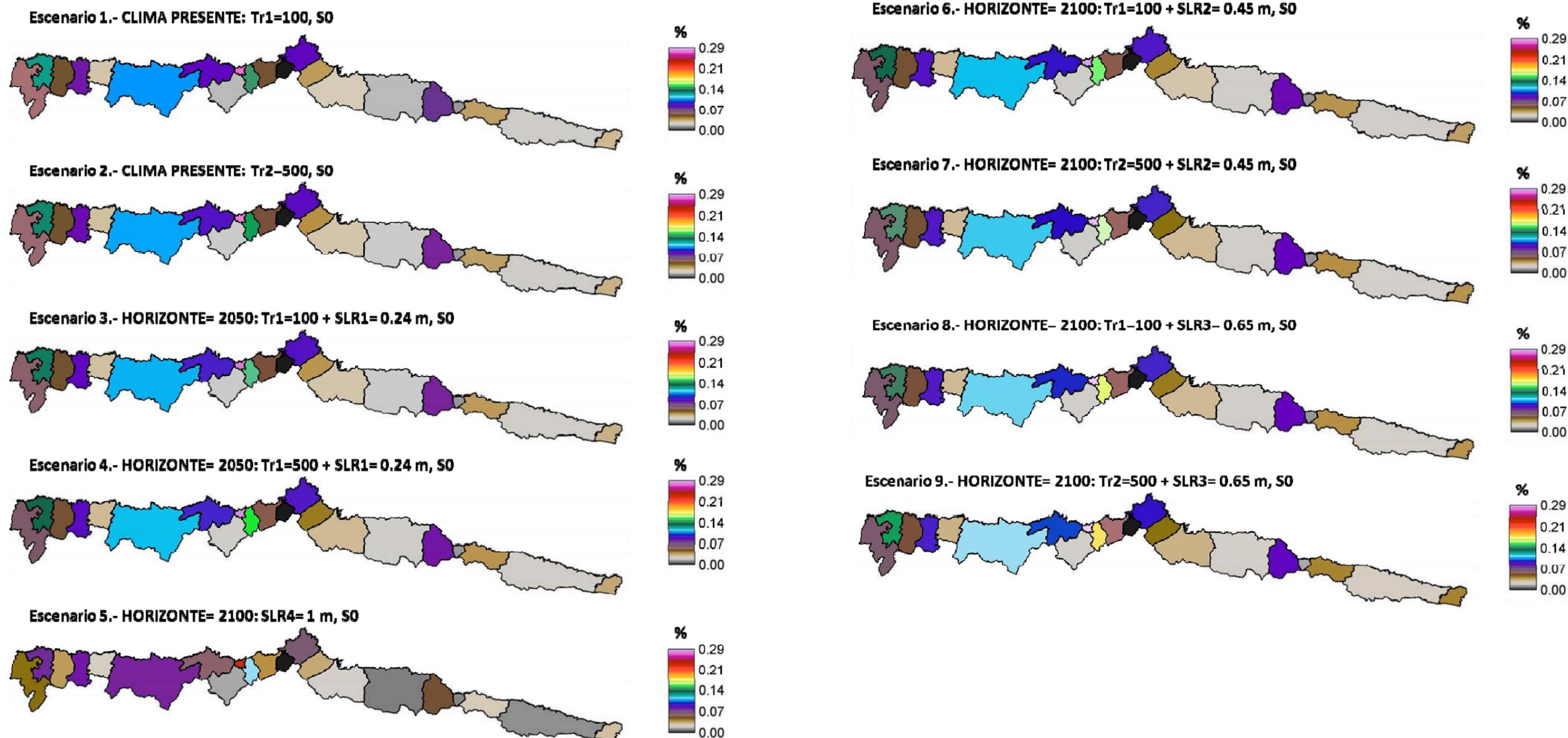


Figura 3.234. Distribución espacial de las consecuencias sobre la producción de servicios ecosistémicos. Resultados sin proyectar ni descontar. Porcentaje respecto al VAB total de cada concejo, de 2010.



Figura 3.235. Distribución espacial de los concejos costeros del litoral asturiano.

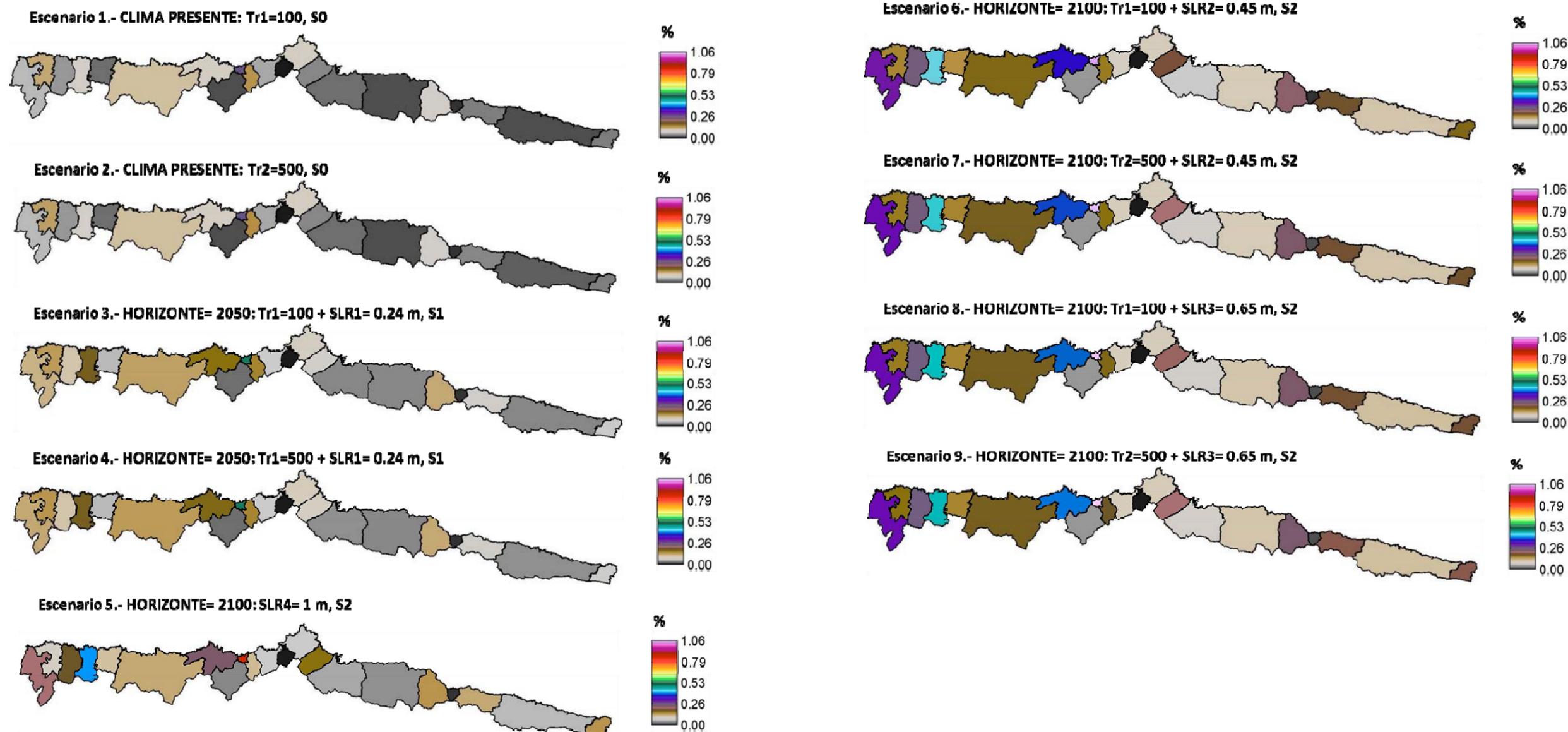


Figura 3.236. Distribución espacial de las consecuencias sobre la producción de servicios ecosistémicos. Resultados proyectados sin descontar. Porcentaje respecto al VAB total de cada concejo, de 2010.



Figura 3.237. Distribución espacial de los concejos costeros del litoral asturiano.

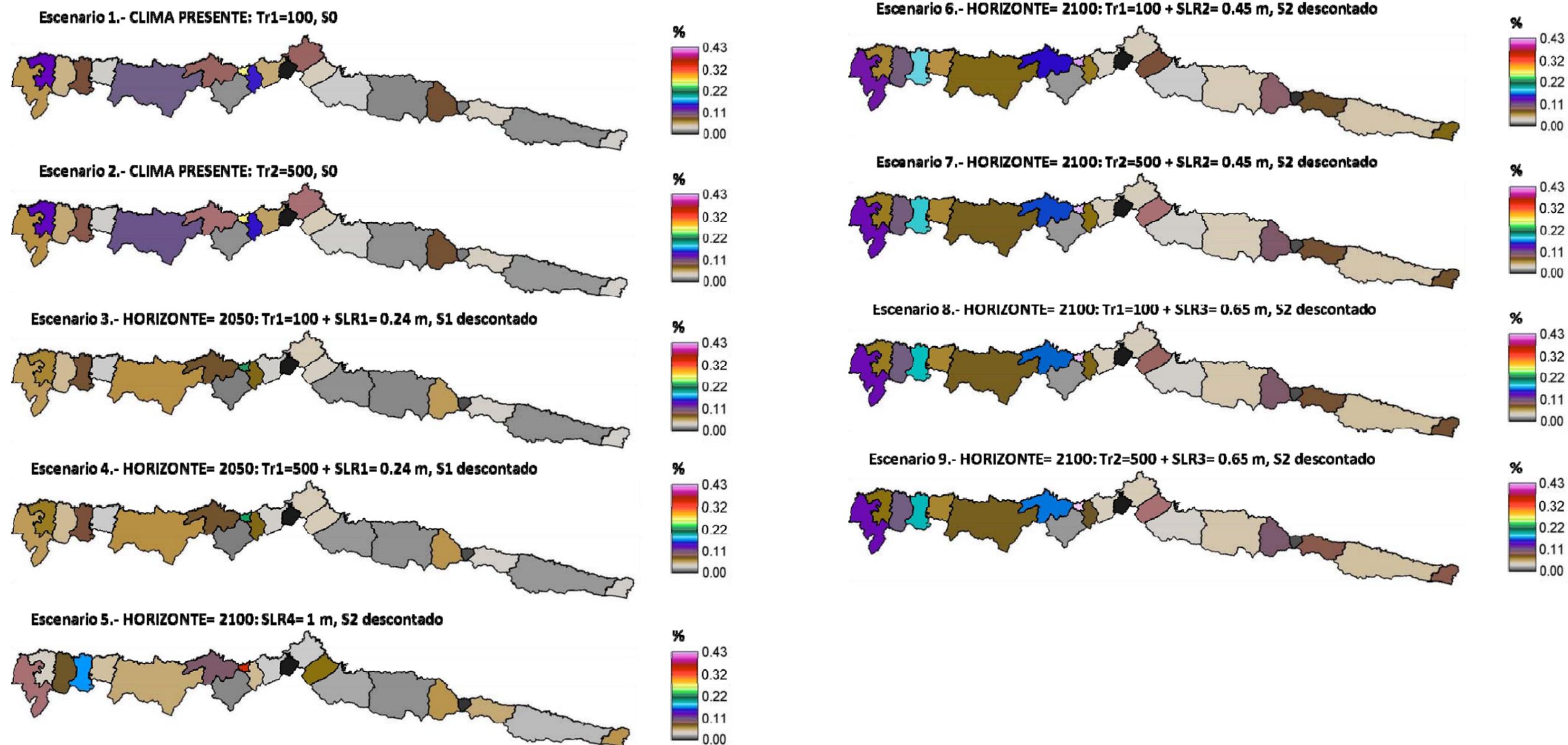


Figura 3.238. Distribución espacial de las consecuencias sobre la producción de servicios ecosistémicos. Resultados proyectados y descontados. Porcentaje respecto al VAB total de cada concejo, de 2010.

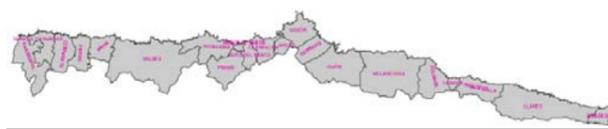


Figura 3.239. Distribución espacial de los concejos costeros del litoral asturiano.

3.4.4. Identificación de subsistemas críticos afectados

En este apartado se muestran las infraestructuras críticas identificadas bajo el área de afección de los escenarios climáticos propuestos.

El criterio de selección de subsistemas críticos se ha llevado a cabo en base a lo expuesto en el apartado 3.3.1.5 de este documento y para tal fin se han empleado diversas capas vectoriales procedentes de las bases de datos BCN25/BTN25 del IGN.

A continuación, se muestra la distribución espacial de las infraestructuras críticas, además de detalles de zonas concretas, para algunos de los escenarios climáticos considerados: escenario 1, que responde al evento de 100 años de periodo de retorno en el clima actual (véanse las figuras 3.240 y 3.241), escenario 3, representativo del evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050 (véanse las figuras 3.242 y 3.243), escenario 5, que muestra la inundación permanente por aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100 (véanse las figuras 3.244 y 3.245), escenario 8, en respuesta al evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (véanse las figuras 3.246 y 3.247), y el escenario 9, que es el más pesimista y representa el evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (véanse las figuras 3.248 y 3.249). Nótese que el valor 0.65 m de incremento de nivel corresponde al valor medio en la costa del Principado de Asturias y ha sido modificado localmente con Slangen et al. (2014). En todos los casos el agua llega a carreteras convencionales y, a excepción del escenario de inundación permanente, también a líneas de ferrocarril e infraestructuras de carreteras, como es el caso de aparcamientos o estaciones de autobús. Los escenarios en los que se producen mayores daños son los que responden a la combinación de un evento extremo con una subida de nivel de 0.65 m, donde se ven afectadas una central lechera, una subestación eléctrica, un transformador eléctrico y una estación de ferrocarril.



Figura 3.240. Distribución espacial de las infraestructuras críticas afectadas para E1: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el clima actual.



Figura 3.241. Detalle de las infraestructuras críticas afectadas en San Pedro (panel izquierdo), San Antolín (panel en centro-izquierda), Ribadesella (panel en centro-derecha) y Toró (panel derecho) para E1: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el clima actual.



Figura 3.242. Distribución espacial de las infraestructuras críticas afectadas para E3: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050.



Figura 3.243. Detalle de las infraestructuras afectadas en San Pedro (panel izquierdo), Colunga (panel en centro-izquierda), Ribadesella (panel en centro-derecha) y Nalón (panel derecho) para E3: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.24 m a 2050.



Figura 3.244. Distribución espacial de las infraestructuras críticas afectadas para E5: Inundación permanente por aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100.



Figura 3.245. Detalle de las infraestructuras críticas afectadas en Ribadeo (panel izquierdo), Barayo (panel centro-izquierda), Ribadesella (panel en centro-derecha superior) y Niembro (panel en centro-derecha inferior y panel derecho) para E5: Inundación permanente por aumento del nivel medio del mar de 1 m a 2100.

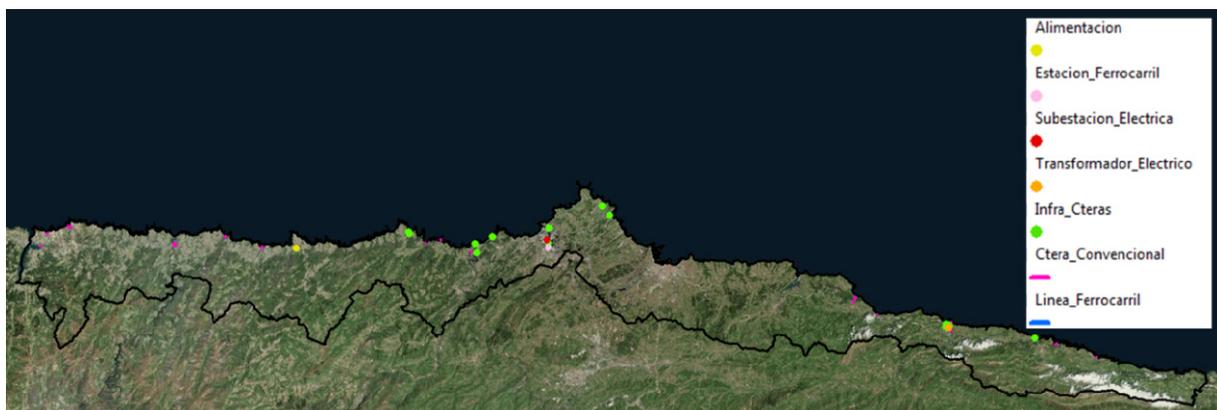


Figura 3.246. Distribución espacial de las infraestructuras críticas afectadas para E8: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio del RCP8.5 en la costa asturiana modificado localmente).



Figura 3.247. Detalle de las infraestructuras críticas afectadas en Cueva (panel izquierdo), Aviés (panel en centro-izquierda), Ribadesella (panel en centro-derecha) y Candás (panel derecho) para E8: Evento extremo de 100 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio del RCP8.5 en la costa asturiana modificado localmente).

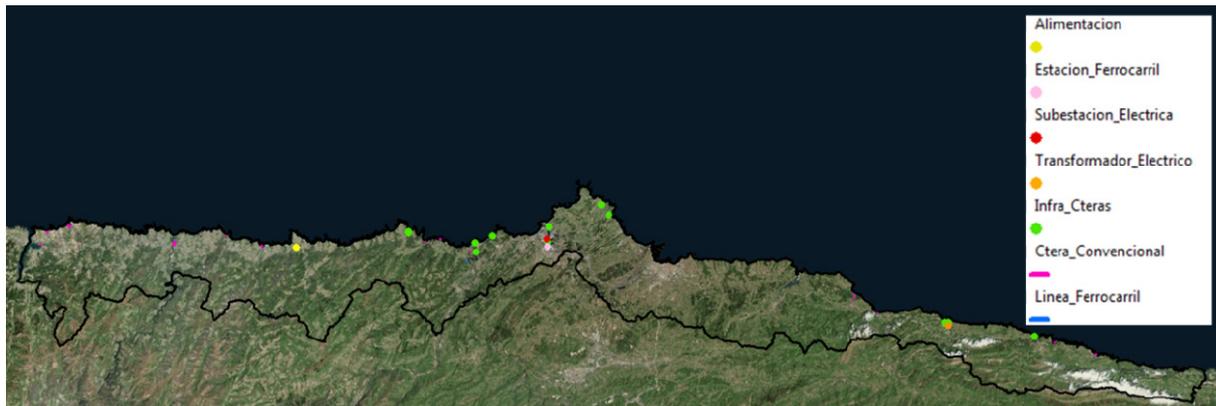


Figura 3.248. Distribución espacial de las infraestructuras críticas afectadas para E9: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio del RCP8.5 en la costa asturiana modificado localmente).



Figura 3.249. Detalle de las infraestructuras críticas afectadas en Luarca (panel izquierdo), Ribadesella (panel en centro-izquierda), Playa de Vega (panel en centro-derecha) y Gijón (panel derecho) para E9: Evento extremo de 500 años de periodo de retorno con un aumento del nivel medio del mar de 0.65 m a 2100 (valor medio del RCP8.5 en la costa asturiana modificado localmente).

Finalmente, la tabla 3.12 muestra una relación de los subsistemas afectados para cada uno de los escenarios propuestos. Las infraestructuras críticas puntuales se han contabilizado por unidades afectadas y, las infraestructuras críticas lineales por km lineal afectado.

ESCENARIOS CLIMÁTICOS	INDUSTRIA ALIMENTARIA	TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS	SUBESTACIONES ELÉCTRICAS	INFRAESTRUCTURAS DE CARRETERAS	ESTACIONES DE FFCC	KM DE CARRETERA CONVENCIONAL	KM DE LÍNEA DE FFCC
E1	-	-	-	6	-	29.83	2.76
E2	-	-	-	6	-	35.29	3.00
E3	-	-	-	9	-	41.10	3.27
E4	-	-	-	10	-	45.08	3.27
E5	-	-	-	-	-	1.86	-
E6	-	1	-	11	-	48.46	3.48
E7	-	1	-	14	-	58.24	22.31
E8	1	1	1	16	1	80.90	40.06
E9	1	1	1	17	1	85.31	46.59

Tabla 3.12. Relación de escenarios climáticos e infraestructuras críticas afectadas

4. RIESGO SOBRE EL SISTEMA NATURAL

4.1. Introducción

En las últimas décadas, se ha incrementado el interés por aspectos relacionados con el cambio climático y la adaptación, no sólo desde una perspectiva social y económica, sino también ecológica. Dentro de este marco, se han analizado los impactos del cambio climático sobre las especies y ecosistemas costeros en la costa de Asturias, en concreto aquellos derivados del aumento de la temperatura y del potencial incremento del nivel de mar, con los consecuentes procesos de inundación. Para ello, se ha adoptado un esquema de trabajo conceptual basado en un análisis de riesgos que considera la probabilidad de consecuencias negativas en zonas expuestas como resultado de la acción de un peligro durante un período de tiempo (Scheniderbauer y Ehrlich, 2004). Por lo tanto, la metodología utilizada para calcular el riesgo depende de la probabilidad de ocurrencia de un peligro, de la exposición de los hábitats costeros y especies y de su vulnerabilidad (IPCC, 2014).

De manera más concreta, para la identificación, caracterización y/o estimación cuantitativa de los peligros, exposición, vulnerabilidad e impactos se han considerado las definiciones establecidas en el último informe del IPCC (IPCC, 2014):

- **Peligro:** Acaecimiento potencial de un suceso o tendencia físico de origen natural o humano, o un impacto físico, que puede causar pérdidas de vidas, lesiones u otros efectos negativos sobre la salud, así como daños y pérdidas en propiedades, infraestructuras, medios de subsistencia, prestaciones de servicios, ecosistemas y recursos ambientales.
- **Exposición:** La presencia de personas; medios de subsistencia; especies o ecosistemas; funciones, servicios y recursos ambientales; infraestructura; o activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente.
- **Vulnerabilidad:** Propensión o predisposición a ser afectado negativamente. La vulnerabilidad comprende una variedad de conceptos y elementos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación.
- **Impacto:** Efectos en los sistemas naturales y humanos de episodios meteorológicos y climáticos extremos y del cambio climático. Los impactos generalmente se refieren a efectos sobre las vidas, medios de subsistencia, salud, ecosistemas, economía, sociedad, cultura, servicios e infraestructuras debido a la interacción del cambio climático o eventos climáticos peligrosos que ocurren en un momento específico y de la vulnerabilidad de una sociedad o sistema expuestos.

4.2. Peligros

La temperatura y el nivel medio del mar se definen como dos de los principales forzamientos climáticos que potencialmente afectan a los hábitats y especies costeros, atendiendo a las proyecciones realizadas para diferentes escenarios. Por ello, como primera aproximación, este trabajo se centra en el análisis de los impactos potenciales asociados a dichos forzamientos, sin obviar el papel que puedan jugar otras variables físicas, químicas y biológicas en la distribución de determinados organismos y en el funcionamiento global del ecosistema.

4.2.1. Aumento del nivel medio del mar

El cambio climático y, concretamente, los cambios en las dinámicas marinas suponen un riesgo para la conservación y gestión de los hábitats naturales costeros. Entre los múltiples impactos que generan sobre el hábitat físico destacan los cambios en la profundidad, hidroperíodo, velocidad de la corriente y energía del oleaje, los cuales determinan, a su vez, modificaciones en los patrones de distribución de las especies. De todos ellos, los impactos más significativos sobre el medio natural se atribuyen a la inundación de hábitats continentales emergidos, ya sea de forma permanente o por exposición a un hidroperíodo característico de zonas intermareales. En general, se asume que los hábitats y especies son altamente vulnerables a dicho peligro. Por el contrario, los hábitats y especies muestran una baja vulnerabilidad frente a eventos extremos de aumento del nivel del agua con período de retorno superior a 100 años, ya que su tiempo de recuperación es generalmente inferior.

La expansión térmica del agua del mar y el deshielo son los dos factores principales que causan el aumento del nivel medio del mar global (Meehl *et al.*, 2007). Las proyecciones de dicho nivel se obtienen a partir de modelos basados en procesos físicos (modelos acoplados atmósfera-océano), que contemplan aumentos de hasta 1 m a finales del siglo XXI, y modelos semi-empíricos (datos paleoclimáticos y formulaciones semi-empíricas), que dan valores más elevados entre 1.5 y 2.5 m.

4.2.1.1. Metodología

Concretamente, para la cuantificación de los impactos en la zona de estudio se utilizó un escenario climático extremo de aumento del nivel medio del mar de 1 metro a 2100 (Escenario 5). Como escenario de referencia se utilizó el nivel medio del mar actual.

Para ambos escenarios se obtuvo la inundación costera con el modelo hidrodinámico bidimensional RFSM-EDA, concretamente, se calculó la cota máxima alcanzada por el agua en una pleamar viva equinoccial. Los forzamientos introducidos al modelo en todos los escenarios fueron el caudal medio anual de los ríos principales y la marea astronómica, teniendo en cuenta la proyección del nivel medio del mar en cada escenario.

4.2.1.2. Resultados

En el escenario de referencia se observa la inundación sin aumento del nivel medio del mar, en función de la cual se distribuyen los hábitats y especies costeros en la actualidad (Figura 4.1). En dicha imagen destaca la presencia de tres estuarios, que se corresponden con las desembocaduras de los ríos Navia, Negro y Esva (de izquierda a derecha en la Figura 4.1), y que favorecen la entrada de la inundación hacia zonas continentales interiores.

El aumento del nivel medio del mar conlleva un incremento en la inundación costera, tanto en términos de superficie inundada como de altura de la columna de agua (Figura 4.1 la figura 4.1). En cuanto a la distribución espacial de dichas inundaciones, éstas se concentran en el estuario de Navia, donde se observa un mayor incremento de la superficie inundada en comparación con otros estuarios, playas y zona costera en general. Las nuevas zonas inundadas se caracterizan por láminas de agua de pequeño espesor.

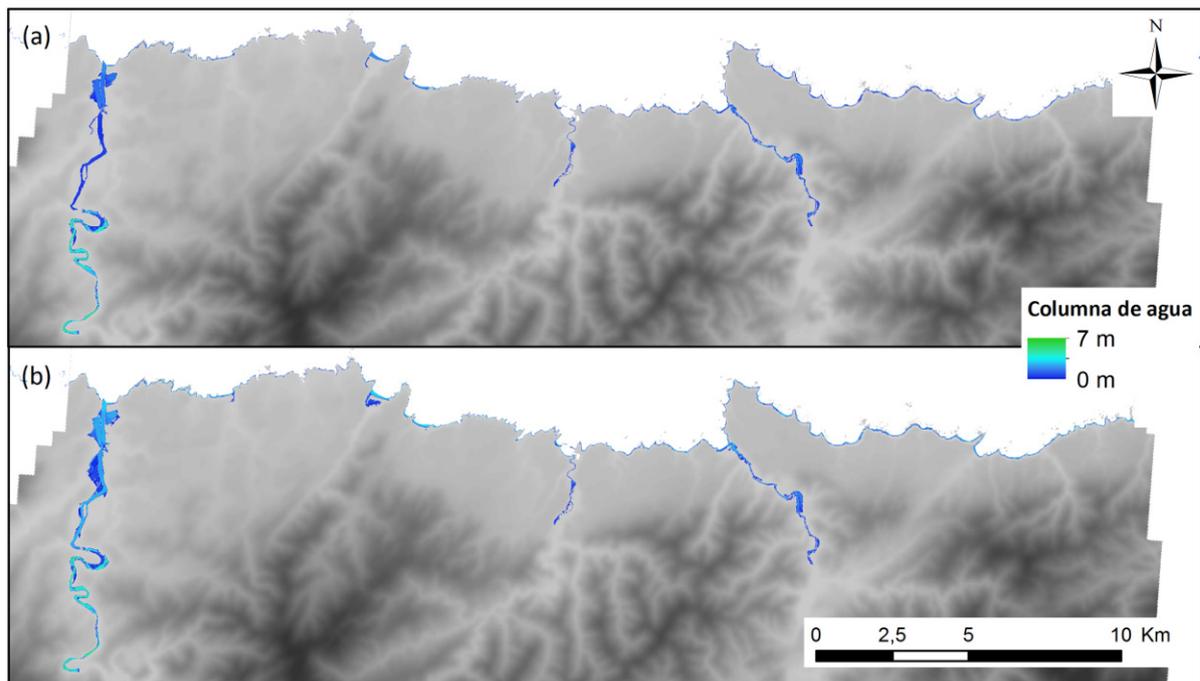


Figura 4.1. Mapa de inundación costera y altura de la columna de agua en el (a) escenario de referencia, sin aumento del nivel medio del mar, y en el (b) escenario 5, con un aumento del nivel del mar de 1 metro.

4.2.2. Cambio de la temperatura superficial del agua

La temperatura es uno de los factores más determinantes en los patrones y funciones biológicos, jugando un papel clave para el desarrollo y supervivencia de las especies. Por ello, los cambios en las temperaturas medias y extremas de la superficie del agua pueden alterar de forma significativa los ecosistemas marinos (Hoegh-Guldberg et al., 2010). Según las proyecciones de cambio climático, el calentamiento del océano en las capas superiores será aproximadamente de entre 0.6 °C y 2 °C al final del siglo XXI (IPCC, 2013). Estas modificaciones se asocian con considerables diferencias en la fisiología y en los patrones de distribución espaciales y temporales de distintas especies marinas, así como en la estructura y dinámica de hábitats (Wernberg et al., 2011). El aumento progresivo de la temperatura también podrá afectar al reclutamiento, crecimiento y productividad de los organismos estructurantes de los ecosistemas marinos, como las macroalgas o las fanerógamas marinas.

4.2.2.1. Metodología

Como se ha explicado en el apartado correspondiente a las proyecciones de cambio climático, para el caso de la temperatura superficial del agua se han seleccionado 22 modelos climáticos globales. Cada uno de estos modelos genera unas condiciones futuras del clima para los dos escenarios considerados (RCP 4.5 y 8.5), obteniendo como resultado final el *ensemble* de todos ellos.

Para la proyección de la temperatura superficial del agua (SST) y su efecto en la distribución de especies y regiones biogeográficas se han utilizado dos períodos de tiempo de 30 años cada uno: 2040-2069 y 2070-2099. De esta manera, para cada uno de los dos escenarios RCP considerados (4.5 y 8.5) se obtiene una proyección de la SST en la zona de estudio para el medio y largo plazo.

Para obtener los incrementos en la temperatura máxima, los valores de estas proyecciones a lo largo de la cornisa Cantábrica se han comparado con los valores obtenidos para el periodo de referencia o control (1975-2005) aplicando los mismos modelos (comparación clásica). De esta manera se han generado los valores de cambio para cada escenario en cada uno de los dos períodos analizados.

4.2.2.2. Resultados

4.2.2.2.1. Escala de estudio: N y NO Península Ibérica

El patrón observado a lo largo la cornisa Cantábrica muestra un mayor incremento de la temperatura hacia el interior del Golfo de Vizcaya (Figura 4.2 y Figura 4.3). En concreto, para el escenario 4.5 la temperatura máxima aumenta hasta 2 °C en el periodo 2070-2099 (largo plazo) en la zona oriental, mientras que en la occidental aumenta alrededor de 1.5 °C. Este aumento de 1.5 °C se mantiene en dicha zona para el escenario 8.5 a medio plazo, mientras que para el largo plazo la temperatura se incrementa 2.5 °C. Los mayores aumentos de temperatura se producen en la zona Este del área de estudio, llegando incluso a los 3.5 °C.

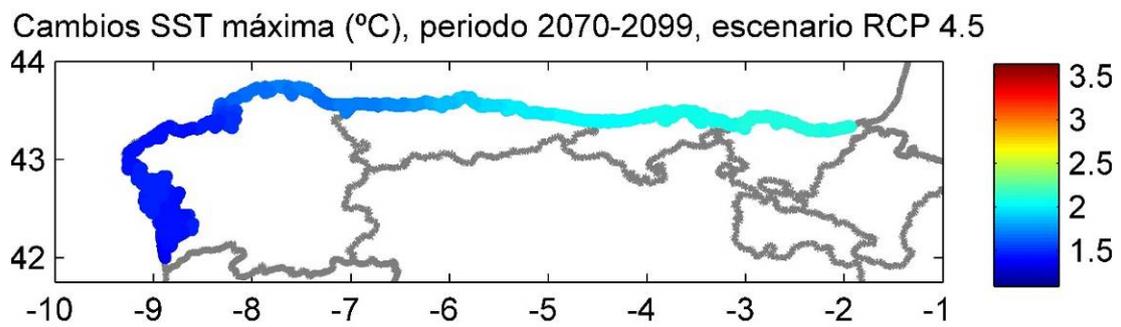
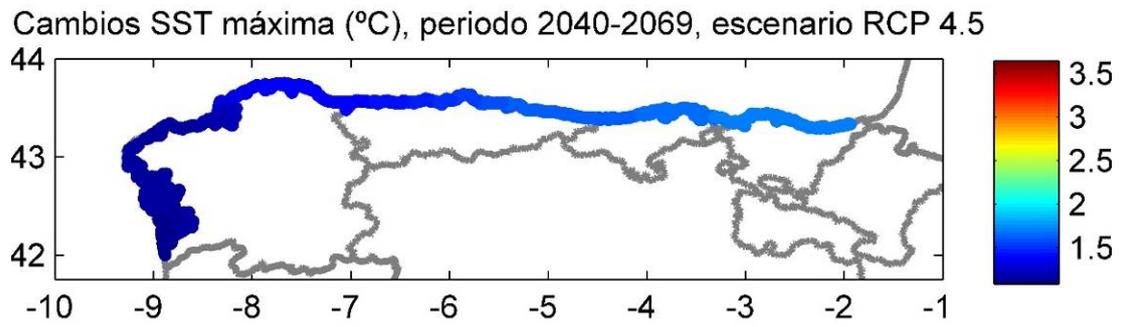


Figura 4.2. Cambios en la SST máxima (°C) para el escenario RCP 4.5. Panel superior: medio plazo (2040-2069). Panel inferior: largo plazo (2070-2099).

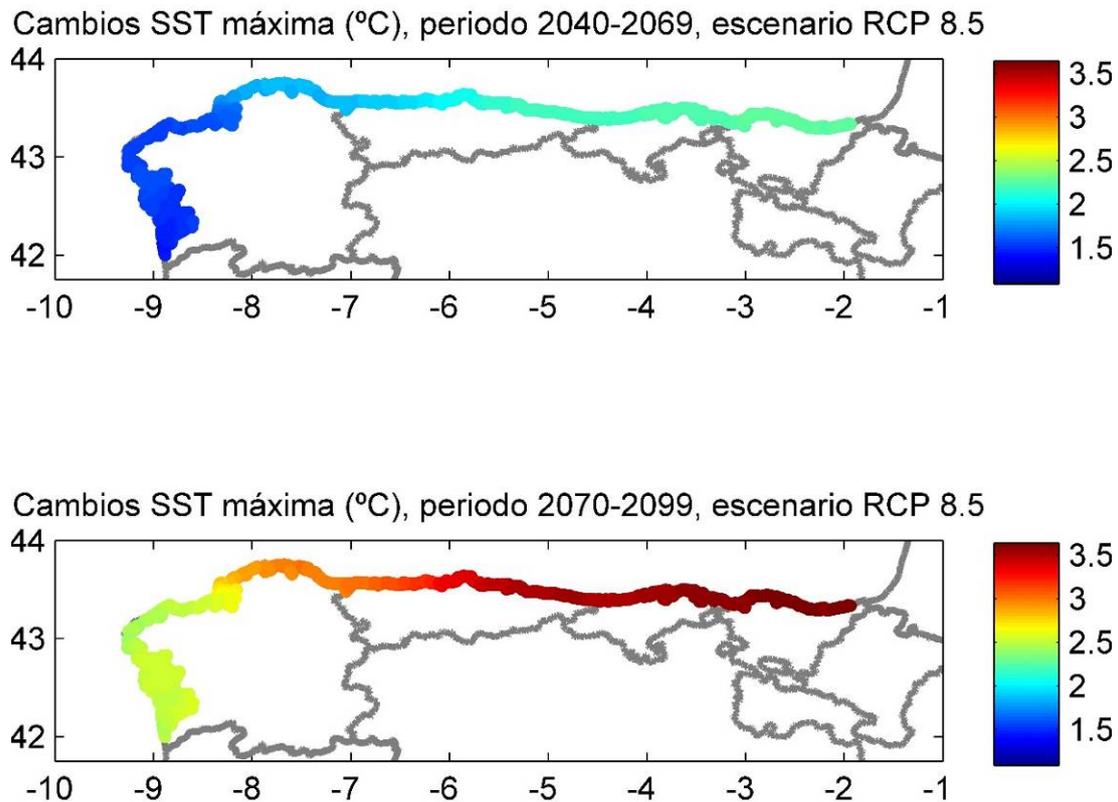


Figura 4.3. Cambios en la SST máxima (°C) para el escenario RCP 8.5. Panel superior: medio plazo (2040-2069). Panel inferior: largo plazo (2070-2099).

4.2.2.2.2. Escala de estudio: Europa

Para la escala europea se han establecido tres indicadores, temperatura superficial del agua media, mínima y máxima, para caracterizar tanto las situaciones medias como las extremas.

Para los periodos de tiempo proyectados se observa un gradiente N-S con diferencias entre los distintos indicadores utilizados, en lo que a la magnitud de los incrementos se refiere, tal y como se detalla a continuación.

SST Media

Los aumentos de temperatura superficial media alcanzan valores cercanos a 5°C (4.83°C) para la ruta representativa de concentración más pesimista (RCP 8.5) y de 3.12°C para la RCP 4.5. En ambos casos los mayores cambios se producen en el largo plazo (con diferencias de 1.7°C con respecto al medio plazo para la RCP 8.5 y de 0.7°C para la RCP 4.5) y se localizan en el norte de Suecia, Finlandia y la Península de Kola, en el interior del Mar Báltico, en el Mar Adriático y en el Mar Negro.

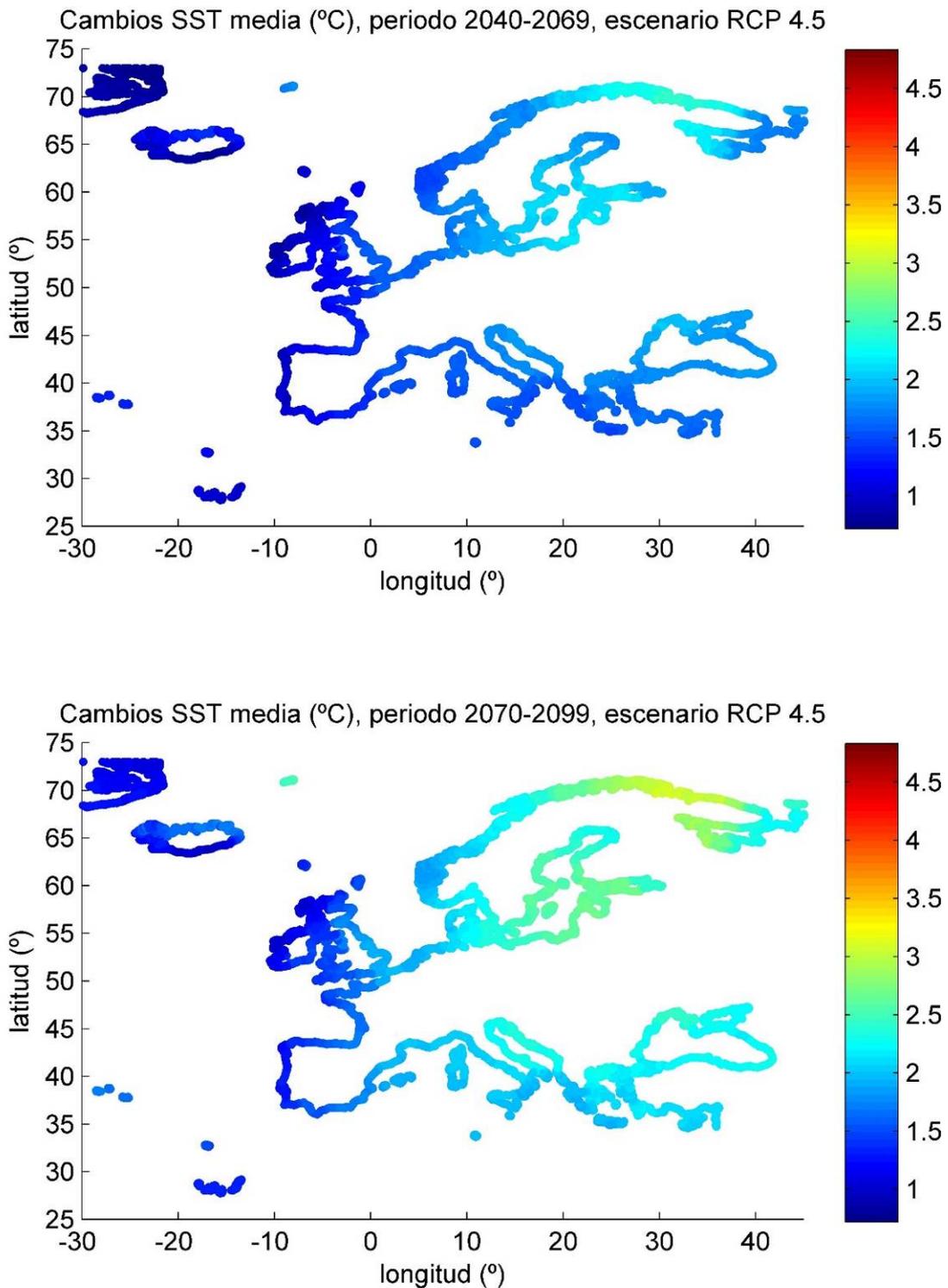


Figura 4.4. Cambios en la SST media (°C) para el escenario RCP 4.5. Panel superior: medio plazo (2040-2069). Panel inferior: largo plazo (2070-2099).

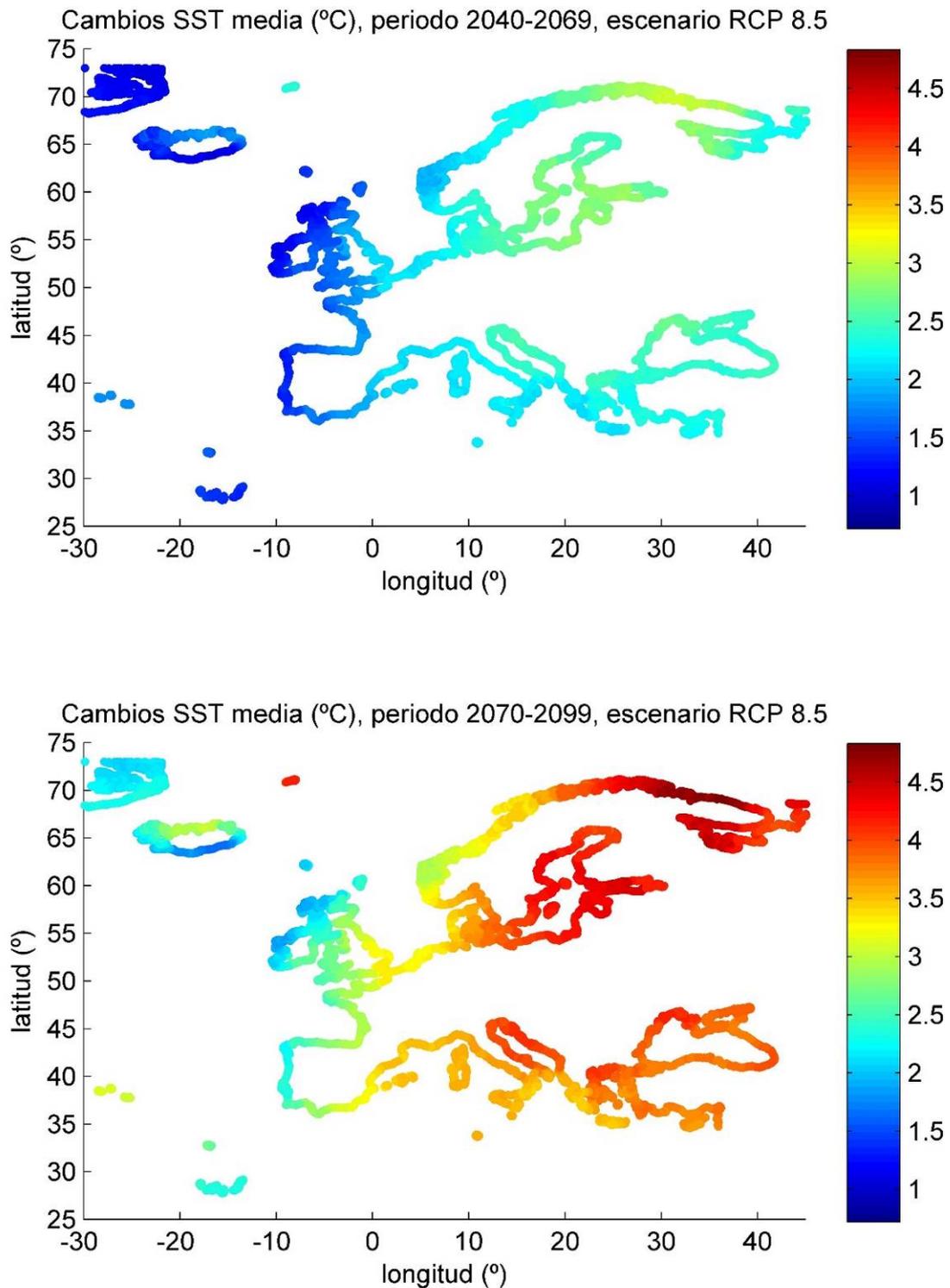


Figura 4.5. Cambios en la SST media (°C) para el escenario RCP 8.5. Panel superior: medio plazo (2040-2069). Panel inferior: largo plazo (2070-2099).

SST Mínima

En lo que a la temperatura mínima se refiere, es la zona este de Europa la que presenta los mayores aumentos, especialmente las zonas con los mayores cambios en la temperatura media (norte de Suecia, Finlandia, la Península de Kola, el sur del Mar Báltico, el Mar Adriático y el Mar Negro). Al igual que para los valores medios, los incrementos en las temperaturas mínimas aumentan a medida que se avanza en el horizonte temporal y en escenarios más pesimistas. Así los valores máximos que se alcanzan para el RCP 4.5 difieren 0.5°C entre los dos periodos (de 1.95°C para el corto plazo a 2.42°C para el largo); mientras que esta diferencia se incrementa 1°C para el RCP 8.5 (de 2.58°C en el periodo 2040-2069 a 4.06°C en el periodo 2070-2099).

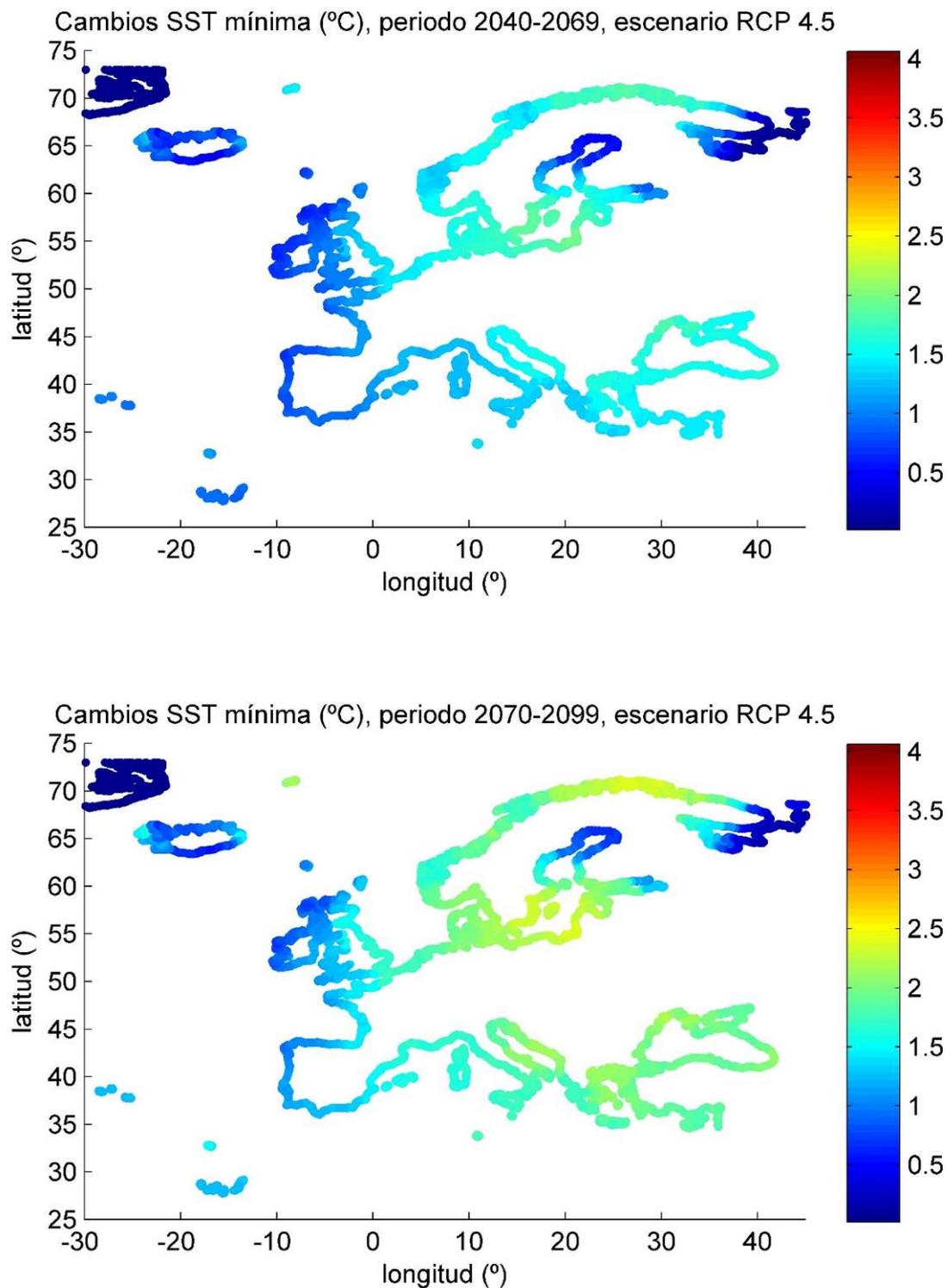


Figura 4.6. Cambios en la SST mínima (°C) para el escenario RCP 4.5. Panel superior: medio plazo (2040-2069). Panel inferior: largo plazo (2070-2099).

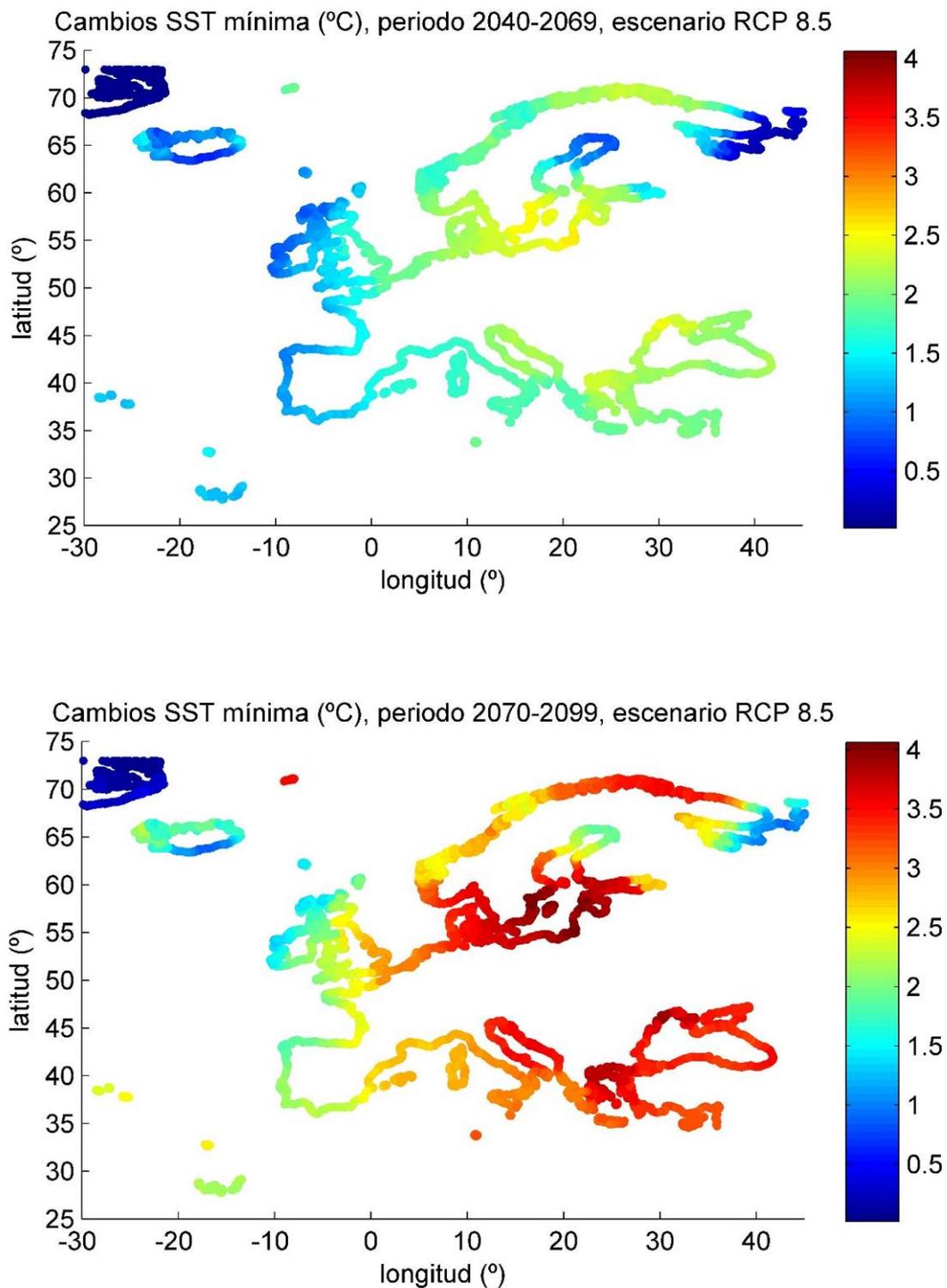


Figura 4.7. Cambios en la SST mínima (°C) para el escenario RCP 8.5. Panel superior: medio plazo (2040-2069). Panel inferior: largo plazo (2070-2099).

SST Máxima

La temperatura superficial máxima alcanza valores superiores a los ya comentados, llegando para el largo plazo de la RCP 8.5 a incrementos mayores de 6°C en el Mar Báltico y la Península de Kola. Para las cuatro proyecciones consideradas, estas zonas, junto con el Mar Adriático, el norte del Mar Báltico y el Mar Negro, presentan los mayores incrementos. Para las temperaturas máximas las diferencias entre el corto y el medio plazo para el RCP 4.5 es de casi 1°C (de 3.46°C a 4.31°C); mientras que el RCP más desfavorable (RCP 8.5) las diferencias alcanzan 2.5°C (de 4.28°C a 6.78°C).

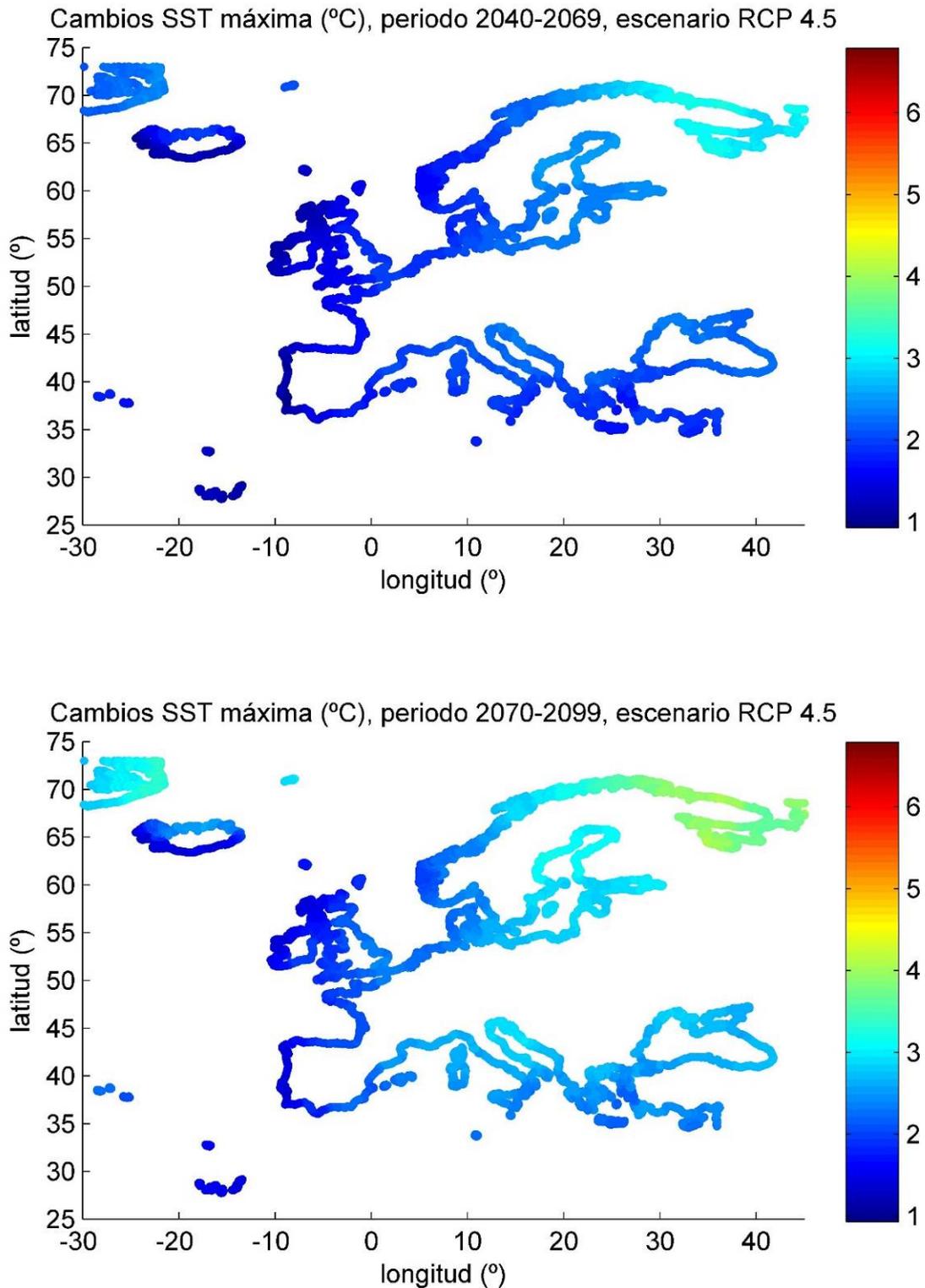


Figura 4.8. Cambios en la SST máxima (°C) para el escenario RCP 4.5. Panel superior: medio plazo (2040-2069). Panel inferior: largo plazo (2070-2099).

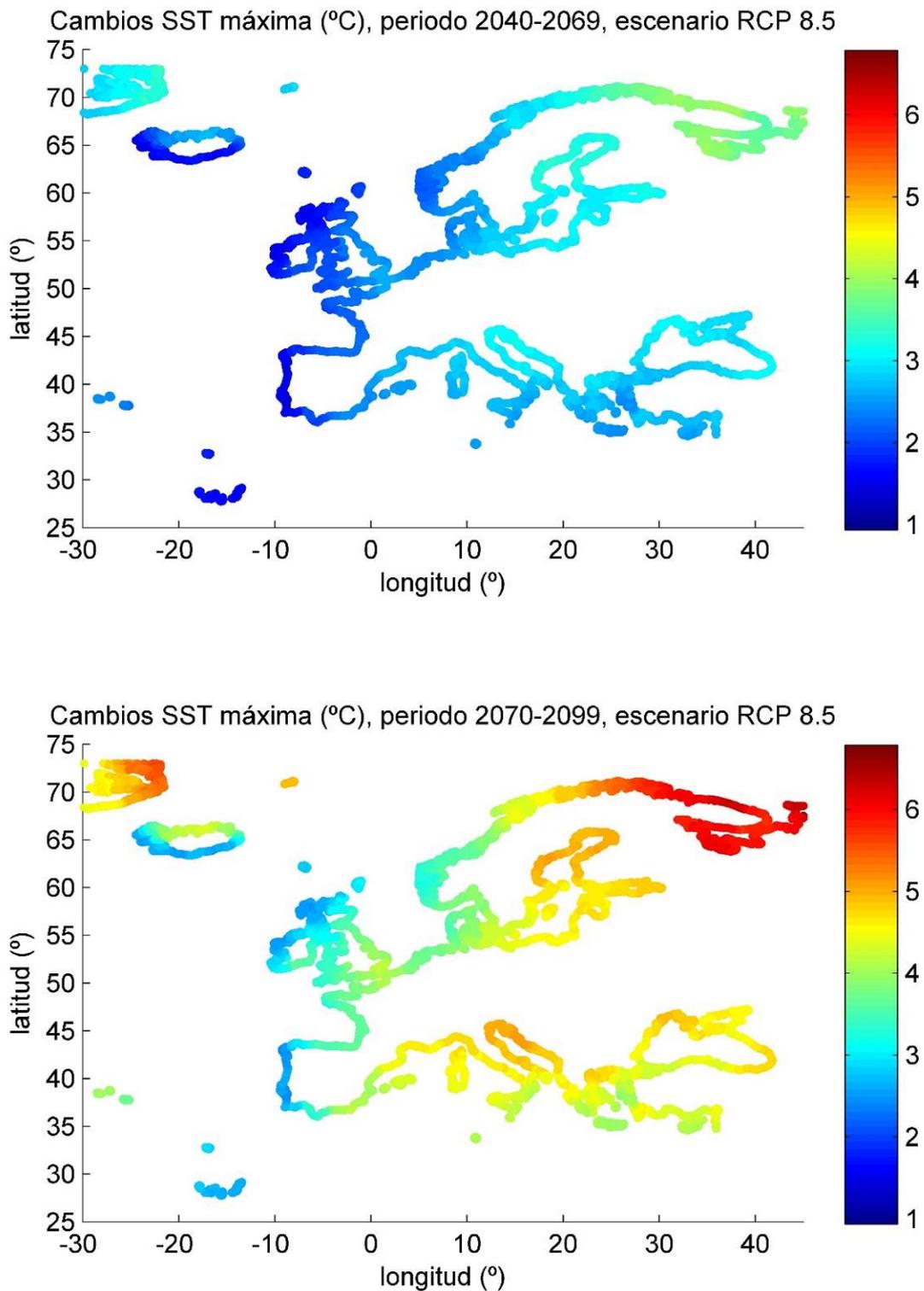


Figura 4.9. Cambios en la SST máxima (°C) para el escenario RCP 8.5. Panel superior: medio plazo (2040-2069). Panel inferior: largo plazo (2070-2099).

4.3. Impactos del aumento del nivel medio del mar sobre los ecosistemas

De acuerdo con el marco de trabajo conceptual, se ha establecido una metodología que consta de cuatro fases, en cada una de las cuales se analizan el riesgo, exposición, vulnerabilidad e impacto de forma secuencial e integrada (véase la figura 4.10). En cada fase se proponen un conjunto de descriptores e indicadores que permiten evaluar, finalmente, el impacto sobre los ecosistemas costeros.



Figura 4.10. Metodología de evaluación del impacto del aumento del nivel medio del mar sobre los ecosistemas.

En primer lugar, la caracterización del riesgo requiere, de acuerdo con dicha metodología, la definición de escenarios de aumento del nivel medio del mar según las proyecciones del IPCC y el establecimiento de los mapas de inundación correspondientes. En segundo lugar, para la evaluación del grado de exposición a dicho riesgo es necesario identificar los hábitats y especies amenazados, así como su distribución espacial. En tercer lugar, la vulnerabilidad se plantea como una medida de la sensibilidad del ecosistema frente a una presión y, por tanto, se relaciona con el grado de protección de los diferentes ecosistemas, presión y, por tanto, se relaciona con el grado de protección de los diferentes ecosistemas, hábitats y/o especies, aspecto que es considerado un indicador de esta fase. Finalmente, con todos los indicadores establecidos en las tres primeras fases se cuantifica el impacto sobre los ecosistemas en términos absolutos y relativos y se determina su distribución espacial, generando información de gran utilidad para la planificación de la gestión y adaptación en un marco de cambio climático.

4.3.1. Exposición

Los ecosistemas costeros se localizan en zonas de poca elevación y, por tanto, se encuentran directamente expuestos a cambios en las dinámicas marinas como consecuencia del cambio climático. En dichos ecosistemas costeros se integran una gran variedad de hábitats y especies que forman un mosaico de gran complejidad tanto física como biológica.

4.3.1.1. Metodología

La identificación de los hábitats existentes en la zona de estudio se llevó a cabo a través de dos aproximaciones diferentes:

- Clasificación de los hábitats según la clasificación europea EUNIS (European Nature Information System). Se trata de una metodología jerárquica que abarca diferentes tipos de hábitats, desde naturales hasta artificiales y desde terrestres hasta marinos.
- Clasificación de los hábitats de interés comunitario *sensu* Anexo I de la Directiva Hábitat 92/43/CEE. En el "Manual de Interpretación de los Hábitats de la Unión Europea" (EU, 2007) se recoge la descripción de dichos hábitats, desde un punto de vista físico, químico y/o biológico.

Las bases de datos y metodologías empleadas para caracterizar la distribución espacial de los hábitats dentro de la zona de estudio dependen del sistema de clasificación utilizado, tal y como se describe en los apartados 4.3.1.1 y 4.3.1.2. En cualquier caso, como resultado final se obtuvo, a partir de dicha caracterización, una estimación de la extensión relativa de los hábitats dentro de la zona de estudio y de su distribución altitudinal, expresada como la función de distribución de los hábitats en función de la cota.

4.3.1.2. Clasificación de hábitats EUNIS

La distribución espacial de los hábitats continentales según la clasificación europea EUNIS se obtuvo a partir de un mapa con resolución 1 Ha desarrollado por el ETC/SIA (European Topic Centre for Spatial Information and Analysis) de la EEA (European Environment Agency). Dicha cartografía se basa en información sobre el tipo de suelo (CORINE Land Cover 2006) y en la aplicación de la clasificación EUNIS al nivel 2 (European Commission, 2014)¹. Para asignar hábitats a las clases de tipo de suelo según CORINE, se combinó información sobre la elevación del terreno, el tipo de suelo, la geología y el clima con información obtenida con herramientas de teledetección sobre la vegetación natural potencial y la fenología de las especies.

El mapa de distribución de los hábitats marinos según la clasificación EUNIS fue generado, con una resolución espacial de 250 m (escala 1/1.000.000), en el marco del proyecto EUSeaMap, financiado por la DG MARE de la Comisión Europea dentro del programa EMODnet (European Marine Observation and Data Network) y del ITERREG Mesh Atlantic. La clasificación de los hábitats marinos a los niveles 3 y 4 del sistema

¹ Links: <http://projects.eionet.europa.eu/eea-ecosystem-assessments/library/draft-ecosystem-map-europe>;
<http://eunis.eea.europa.eu/habitats.jsp>

EUNIS se realizó a partir de información sobre el tipo de sustrato, la zonación biológica y la hidrodinámica².

4.3.1.3. Hábitats de interés comunitario

La información sobre la distribución de los hábitats de interés comunitario (*sensu* Anexo I de la Directiva Hábitat 92/43/CEE) se obtuvo a partir de una cartografía de los mismos a escala 1:50.000 realizada en 2005 en toda la región del Principado de Asturias³ y en 2011 en el ZEC Penarronda-Barayo (cartografía asociada al Instrumento de Gestión Integrado del ZEC ES0000317 según el Decreto 160/2014). Para la realización del inventario de hábitats se utilizó fotografía aérea y trabajo de campo. En la cartografía de 2005 no se identifican todos los hábitats (*e.g.*, hábitats 2120 y 2130) recogidos en los Planes de Gestión de los ZECs (Decreto 160/2014 para el ZEC Penarronda-Barayo, ES0000317, y Decreto 154/2014 para el ZEC Cabo Busto-Luanco, ES1200055).

4.3.1.4. Resultados

4.3.1.4.1. Clasificación de hábitats EUNIS

De acuerdo con las clasificaciones de los hábitats basada en el sistema EUNIS, se han identificado un total de 29 hábitats marinos y continentales que constituyen un mosaico dentro de la zona de estudio (véase la figura 4.11):

- 16 hábitats continentales al nivel de detalle 2.
- 13 hábitats marinos a los niveles de detalle 3, en el caso de ambientes rocosos, y 4, en el caso de ambientes sedimentarios.
- Ausencia de los hábitats costeros característicos del intermareal (A.1, A.2 y B).

²Link: <http://www.emodnet-seabedhabitats.eu/>; <http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>

³ Atlas y Manual de Interpretación de los Hábitat Españoles: http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/atlas_manual_habitats_espanioles.aspx

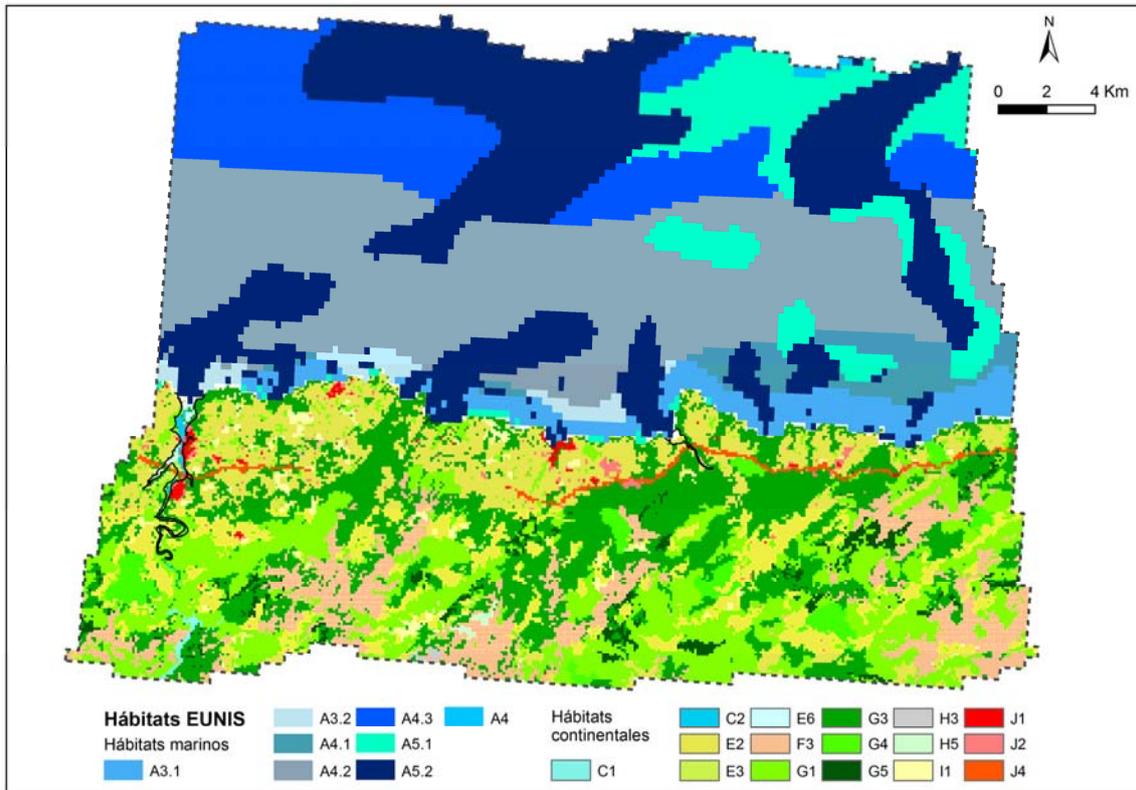


Figura 4.11. Distribución de los hábitats marinos y continentales según la clasificación EUNIS (ver descripción de los hábitats en la Tabla 4.).

A. HÁBITATS MARINOS

- A3. Roca infralitoral y otros sustratos duros
 - A3.1. *Roca infralitoral de alta energía del Atlántico y Mediterráneo*
 - A3.2. *Roca infralitoral de energía moderada del Atlántico y Mediterráneo*
- A4. Roca circalitoral y otros fondos duros
 - A4.1. *Roca circalitoral de alta energía del Atlántico y Mediterráneo*
 - A4.2. *Roca circalitoral de energía moderada del Atlántico y Mediterráneo*
 - A4.3. *Roca circalitoral de baja energía del Atlántico y Mediterráneo*
- A5. Sedimento sublitoral
 - A5.13. *Infralitoral de sedimento grueso*
 - A5.14. *Circalitoral de sedimento grueso*
 - A5.15. *Circalitoral profundo de sedimento grueso*
 - A5.23. *Infralitoral de arena fina*
 - A5.25. *Circalitoral de arena fina*
 - A5.26. *Circalitoral de arenas fangosas*
 - A5.27. *Circalitoral profundo de arena*
 - A5.45. *Circalitoral profundo de sedimento mixto*

C. AGUAS SUPERFICIALES CONTINENTALES

- C1. Láminas de agua estancada naturales
- C2. Láminas de agua corriente de ríos y arroyos

E. PASTIZALES Y TERRENOS DOMINADOS POR HERBÁCEAS, MUSGOS Y LÍQUENES

- E2. Pastizales mesófilos
- E3. Pastizales húmedos
- E6. Estepas halófilas continentales

F. BREZALES, MATORRALES Y TUNDRA

- F3. Matorrales templados y mediterráneos montanos

G. BOSQUES Y OTROS TERRENOS BOSCOSOS

- G1. Bosques plano-caducifolios
- G3. Bosques de coníferas
- G4. Bosques mixtos, de coníferas y frondosas
- G5. Alineaciones de árboles, pequeños bosques de origen antrópico, bosques recientemente cortados, bosques jóvenes y monte bajo

H. HÁBITATS DESPROVISTOS DE VEGETACIÓN, O CON VEGETACIÓN ESCASA, DE TERRITORIOS INTERIORES

- H3. Barrancos, suelos y afloramientos rocosos del interior
- H5. Otras zonas interiores con vegetación abierta o sin vegetación

I. TERRENOS AGRÍCOLAS Y JARDINES

- I1. Terrenos arados y huertas

J. CONSTRUCCIONES Y HÁBITATS ARTIFICIALES

- J1. Construcciones de pueblos y ciudades con alta densidad
- J2. Construcciones de baja densidad
- J4. Redes de transporte y terrenos relacionados

Tabla 4.1. Descripción de los hábitats EUNIS incluidos en la zona de estudio.

Sólo unos pocos hábitats ocupan más del 80% de la superficie marina y continental de la zona de estudio (Figura 4.12). En el caso de los hábitats continentales, dominan los bosques (G3 y G1), los pastizales (E2) y los matorrales (F3), mientras que los hábitats marinos más extensos pertenecen al circalitoral de fondo rocoso (A4) o sedimentario (A5).

En función de la cota, los hábitats muestran un mayor o menor grado de exposición a los efectos del cambio climático sobre las dinámicas marinas, específicamente a cambios en el nivel del mar. Las estepas halófilas (E6) y las láminas de agua corrientes (C2) se distribuyen preferentemente en cotas inferiores (<10 m) mientras que las láminas de agua estancadas (C1) y los pastizales húmedos (E3) se localizan en cotas intermedias (20-70 m) y los otros 11 hábitats en cotas elevadas (>90 m) (Figura 4.13). Las zonas urbanizadas con alta densidad (J1) se asientan a lo largo de todo el gradiente, aunque aproximadamente el 50% de su superficie total se localiza en cotas inferiores a 20 m.

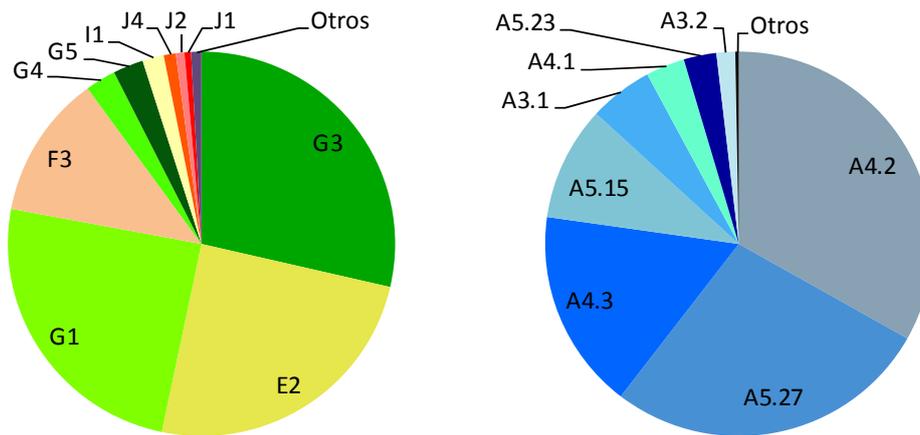


Figura 4.12. Proporción de hábitats continentales (izquierda) y marinos (derecha) en la zona de estudio (ver descripción de los hábitats en la Tabla 4. 4.1). En "Otros" se incluyen 6 hábitats continentales y 5 marinos, respectivamente, de <100 Ha de superficie cada uno.

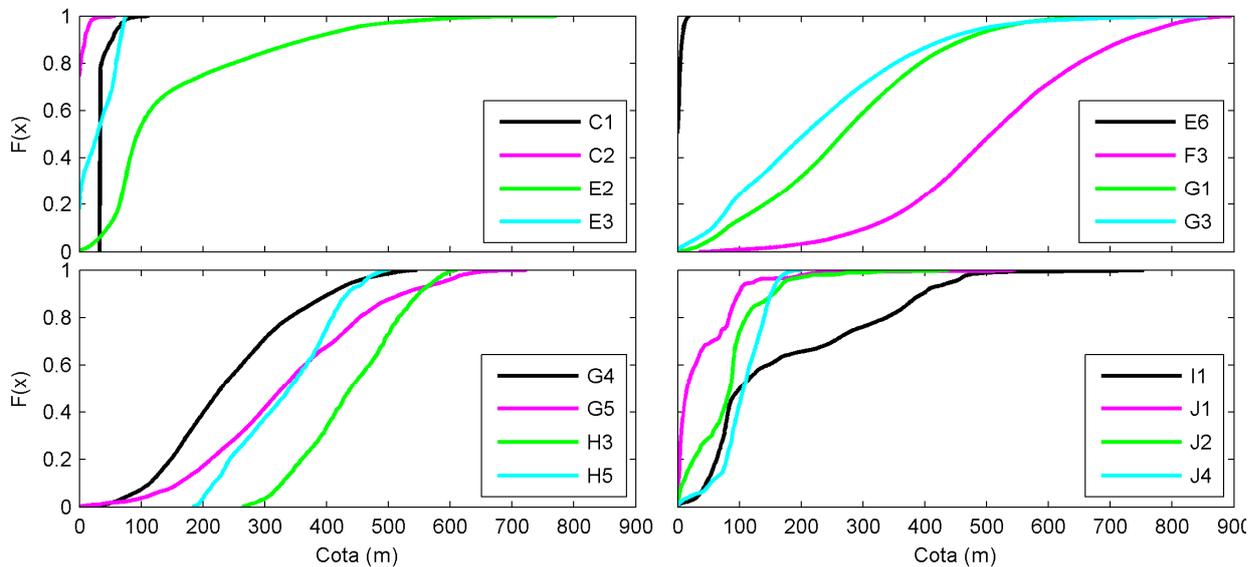


Figura 4.13. Función de distribución de los hábitats EUNIS continentales en función de la cota (Modelo Digital del Terreno: base de datos EU-DEM del programa Copernicus de la Comisión Europea⁴).

⁴ <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/eu-dem>

4.3.1.2.1 Hábitats de interés comunitario

De acuerdo con la cartografía de los hábitats de interés comunitario, se han identificado 28 hábitats en la zona de estudio, de los cuales 7 son hábitats prioritarios (1150, 2130, 3170, 4020, 4040, 7130, 91E0) (véanse la figura 4.14 y la tabla 4.2).

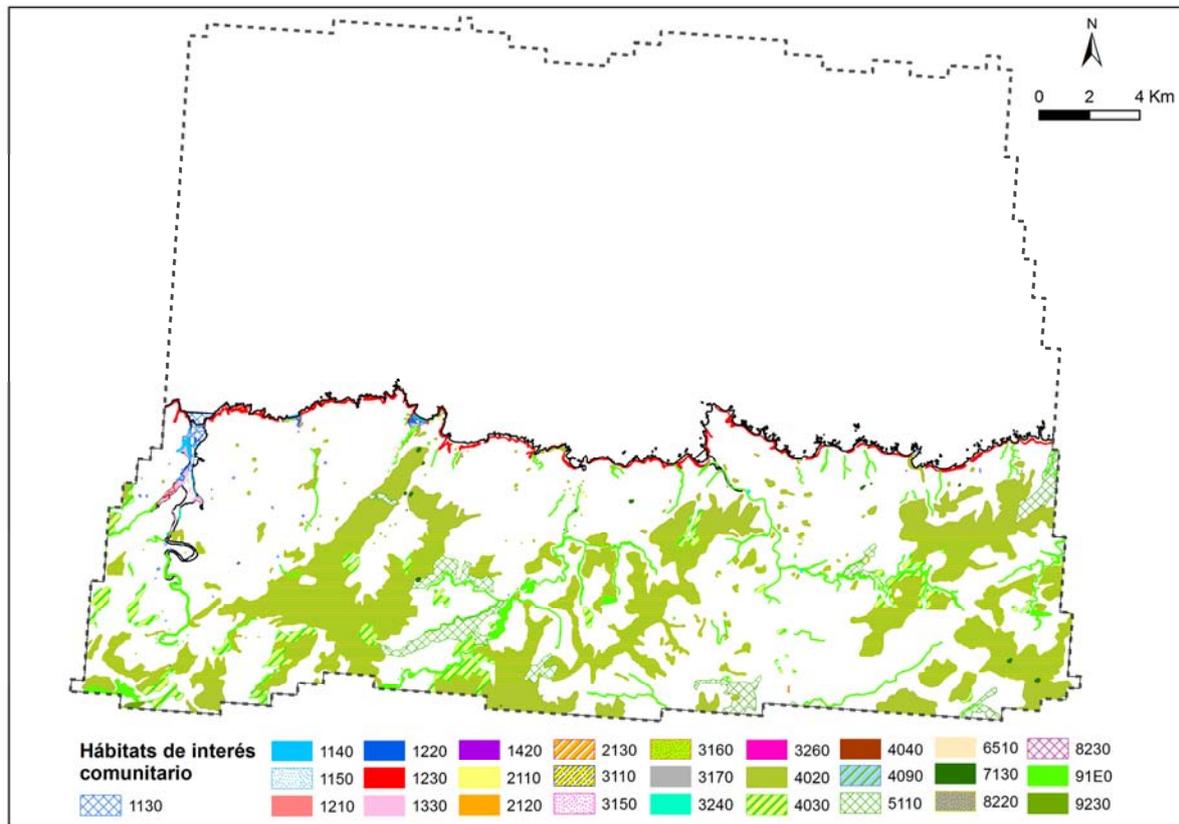


Figura 4.14. Distribución de los hábitats de interés comunitario según la Directiva 92/43/CEE (ver descripción de los hábitats en la tabla 4.2).

Código Natura 2000	Descripción	Área (Ha)
1130	Estuarios	85,86
1140	Llanos fangosos o arenosos que no están cubiertos de agua cuando hay marea baja	43,55
1150*	Lagunas costeras	0,09
1210	Vegetación anual sobre desechos marinos acumulados	6,82
1220	Vegetación perenne de bancos de guijarros	0,24
1230	Acantilados con vegetación de las costas atlánticas y bálticas	292,89
1330	Pastizales salinos atlánticos (<i>Glauco-Puccinellietalia maritima</i>)	52,10
1420	Matorrales halófilos mediterráneos y termoatlánticos (<i>Sarcocornetea fruticosa</i>)	0,96
2110	Dunas móviles embrionarias	0,55
2120	Dunas móviles de litoral con <i>Ammophila arenaria</i> ("dunas blancas")	2,23
2130*	Dunas costeras fijas con vegetación herbácea ("dunas grises")	2,09
3110	Aguas oligotróficas con un contenido de minerales muy bajo de las llanuras arenosas (<i>Littorelia uniflorae</i>)	1,42
3150	Lagos eutróficos naturales con vegetación <i>Magnopotamion</i> o <i>Hydrocharition</i>	0,79
3160	Lagos y estanques distróficos naturales	1,14
3170*	Estanques temporales mediterráneos	0,65
3240	Ríos alpinos con vegetación leñosa en sus orillas de <i>Salix elaeagnos</i>	5,31
3260	Ríos, de pisos de planicie a montano con vegetación de <i>Ranunculion fluitantis</i> y de <i>Callitriche-Batrachion</i>	0,11
4020*	Brezales húmedos atlánticos de zonas templadas de <i>Erica ciliaris</i> y <i>Erica tetralix</i>	9336,09
4030	Brezales secos europeos	967,35
4040*	Brezales secos atlánticos costeros de <i>Erica vagans</i>	3,90
4090	Brezales oromediterráneos endémicos con aliaga	11,00
5110	Formaciones estables xerotermófilas de <i>Buxus sempervirens</i> en pendientes rocosas (<i>Berberidion</i> p.p.).	915,33
6510	Prados pobres de siega de baja altitud (<i>Alopecurus pratensis</i> , <i>Sanguisorba officinalis</i>)	10,95
7130*	Turberas de cobertura (* para las turberas activas)	21,67
8220	Pendientes rocosas silíceas con vegetación casmofítica	0,64
8230	Roquedas silíceas con vegetación pionera del <i>Sedo-Scleranthion</i> o del <i>Sedo albi-Veronicion dellenii</i>	0,13
91E0*	Bosques aluviales de <i>Alnus glutinosa</i> y <i>Fraxinus excelsior</i> (<i>Alno-Padion</i> , <i>Alnion incanae</i> , <i>Salicion albae</i>)	1000,94
9230	Robledales galaico-portugueses con <i>Quercus robur</i> y <i>Quercus pyrenaica</i>	15,96

* Hábitat prioritario

Tabla 4.2. Descripción y extensión de los hábitats de interés comunitario incluidos en la zona de estudio.

Los hábitats de interés comunitario identificados ocupan una extensión total de 12.781 Ha, que representa el 31% de la superficie terrestre en la zona de estudio. Además, un 73% de dicha extensión asociada con la presencia de hábitats de interés comunitario es colonizada por brezales de *E. ciliaris* y *E. tetralix*, hábitat prioritario 4020, (9336 Ha en total) (Figura 4.15). Otros hábitats relativamente extensos son el 4030 (657 Ha, 8%) y 5110 (915 Ha, 7%).

En función de la cota, los hábitats de interés comunitario muestran un mayor o menor grado de exposición al aumento del nivel medio del mar. Los hábitats 11, 12, 13, 14 y 21, estrechamente ligados a zonas estuarinas, acantilados litorales, playas y sistemas dunares se distribuyen principalmente en cotas bajas (<10 m), que *a priori* son las más expuestas (Figura 4.16).

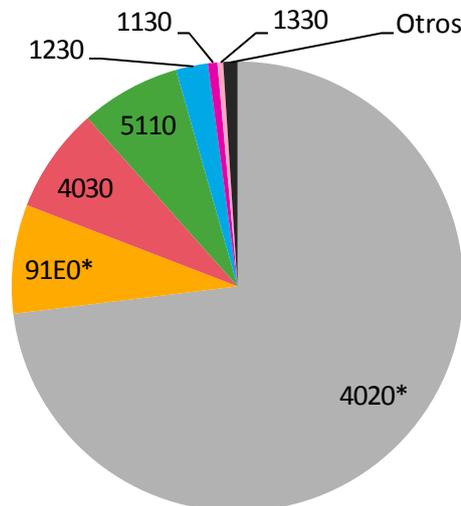


Figura 4.15. Proporción relativa de hábitats de interés comunitaria (ver descripción de los hábitats en la tabla 4.2). En "Otros" se incluyen 14 hábitats de <50 Ha de superficie cada uno.

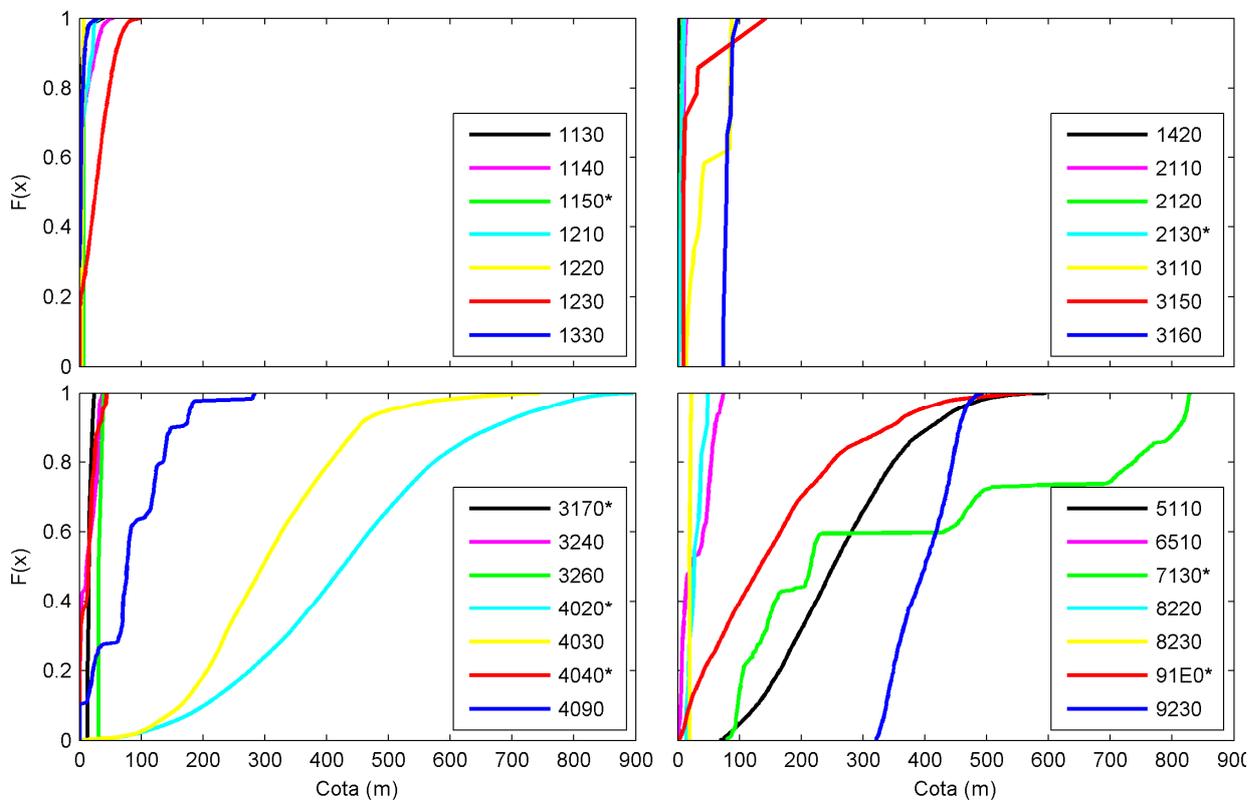


Figura 4.16. Función de distribución de los hábitats de interés comunitario en función de la cota (Modelo Digital del Terreno: base de datos EU-DEM del programa Copernicus de la Comisión Europea).

4.3.2. Vulnerabilidad

La vulnerabilidad de los hábitats y especies que colonizan el territorio depende de una gran variedad de factores, entre los que destacan la tolerancia ambiental y la existencia de figuras de protección, que se relacionan con zonas de alto valor ecológico o naturalidad y alta sensibilidad. Además, existen otros aspectos a tener en cuenta como son la capacidad de migración o de adaptación de las especies.

4.3.2.1. Metodología

En este estudio se ha analizado la vulnerabilidad de los hábitats de acuerdo con la existencia de figuras de protección litorales. La declaración de dichas figuras de protección se debe a características del medio natural singulares en un contexto regional, nacional o comunitario, de tal forma que se considera que los elementos biológicos y ecológicos que albergan son de gran importancia y, por tanto, tienen una vulnerabilidad considerable. Además, estos espacios son especialmente vulnerables a los efectos del cambio climático ya que cualquier alteración de las condiciones físicas, químicas y/o biológicas puede afectar al cumplimiento de los objetivos y requisitos de la legislación que regula su gestión.

En la zona de estudio existen espacios naturales regulados y protegidos por diferentes figuras legales (véase la tabla 4.3).

Figura de protección	Nombre	Código	
ENP ⁽¹⁾	ZEC	Penarronda-Barayo	ES0000317
		Cabo Busto-Luanco	ES1200055
	RNP	Barayo	ES120010
	PP	Costa Occidental	ES120038
	MN	Playa de Frexulfe	ES120030
DMA ⁽²⁾	CW	Costa Oeste Asturias	ES000MAC000020
		Navia costa	ES000MAC000030
	TW	Estuario de Navia	ES234MAT000030
		Estuario del Esva	ES200MAT000040
	RW	Embalse del Arbón	ES234MAR002160
ZPM ⁽³⁾	A	Zona litoral	AST1/03

⁽¹⁾ ENP: Espacio Natural Protegido; ZEC: Zonas Especiales de Conservación; RNP: Reserva Natural Parcial; PP: Paisaje Protegido; MN: Monumento Natural.

⁽²⁾ DMA: Directiva Marco del Agua (2000/60/CE); CW: Masas de agua costeras; TW: Masas de agua de transición; RW: Masas de agua fluviales.

⁽³⁾ ZPM: Zona de producción de moluscos; A: Clase A.

Tabla 4.3. Figuras de protección ambiental incluidos en la zona de estudio.

Cada figura de protección se caracterizó en función de la localización y extensión del área protegida y de la superficie relativa de los hábitats y/o especies que alberga.

4.3.1.2. Resultados

4.3.1.2.1. Espacios naturales protegidos

Red Natura 2000

En el tramo costero analizado se identifican dos ZECs (Zonas Especiales de Conservación) (véase la figura 4.7):

- ZEC Penarronda-Barayo (Decreto 160/2014, de 29 de diciembre, por el que se declara la Zona Especial de Conservación Penarronda-Barayo (ES0000317) y se aprueba el I Instrumento de Gestión Integrado de diversos espacios protegidos en el tramo costero entre Penarronda y Barayo), con una superficie total de 4267 Ha, de las cuales 1640 Ha se localizan dentro de la zona de estudio.
- ZEC Cabo Busto-Luanco (Decreto 154/2014, de 29 de diciembre, por el que se declara la Zona Especial de Conservación Cabo Busto-Luanco (ES1200055) y se aprueba el I Instrumento de Gestión Integrado de diversos espacios protegidos en el tramo costero entre Cabo Busto y Luanco), con una superficie total de 11600 Ha, de las cuales 2459 Ha se localizan dentro de la zona de estudio.

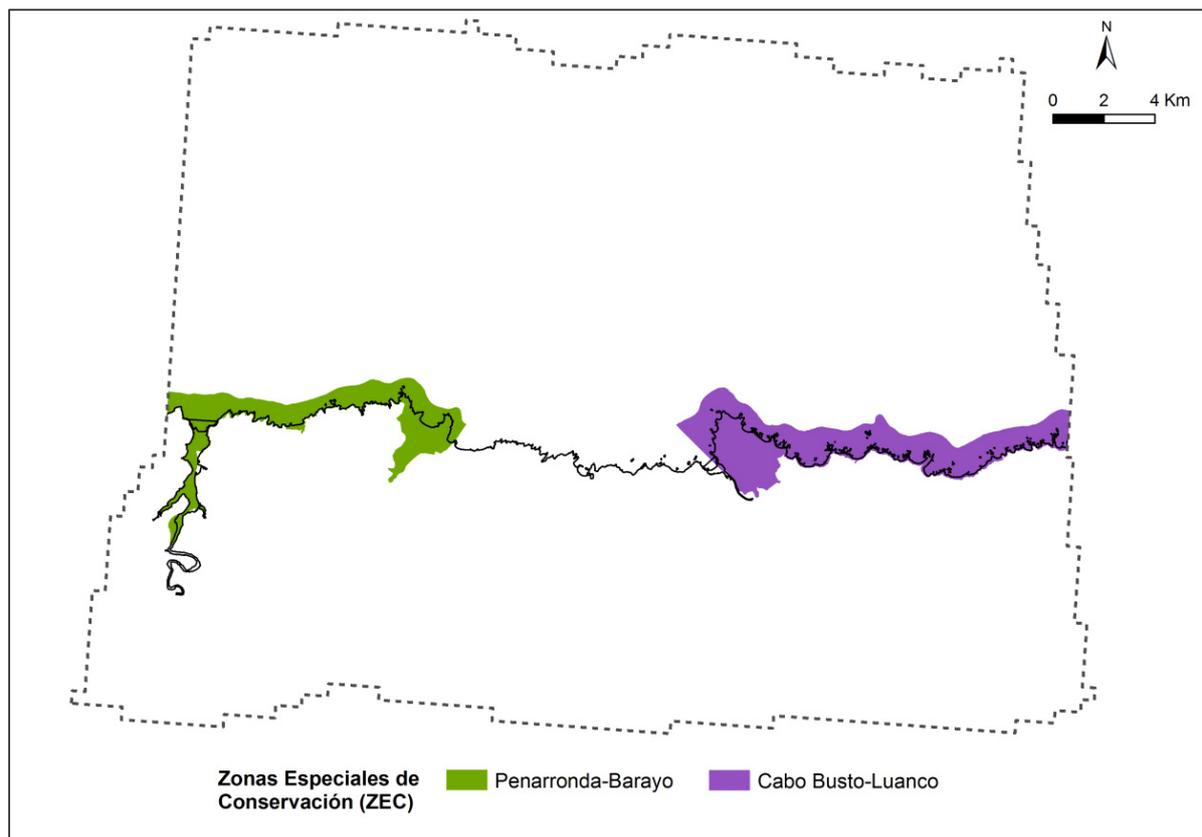


Figura 4.17. Delimitación de las Zonas Especiales de Conservación incluidos dentro de la zona de estudio: ZEC Penarronda-Barayo y ZECCabo Busto-Luanco.

En ambas ZECs se reconoce la existencia de hábitats de interés comunitario que ocupan el 20% de la superficie del ZEC Penarronda-Barayo (331 Ha) y el 17% del ZEC Cabo Busto-Luanco (407 Ha) (véase la figura 4.18). En el primero de ellos, el hábitat dominante son los estuarios (1130) (83 Ha) y, en menor medida, los hábitats costeros formados por pastizales salinos (1330) (51 Ha), (39 Ha), por acantilados con vegetación costera (1230) (43 Ha) y por llanos fangosos o arenosos que no están cubiertos de agua cuando hay marea baja (1140). En el segundo ZEC, se observa una fuerte dominancia del hábitat 1230, es decir, los acantilados con vegetación de las costas atlánticas (68 Ha).

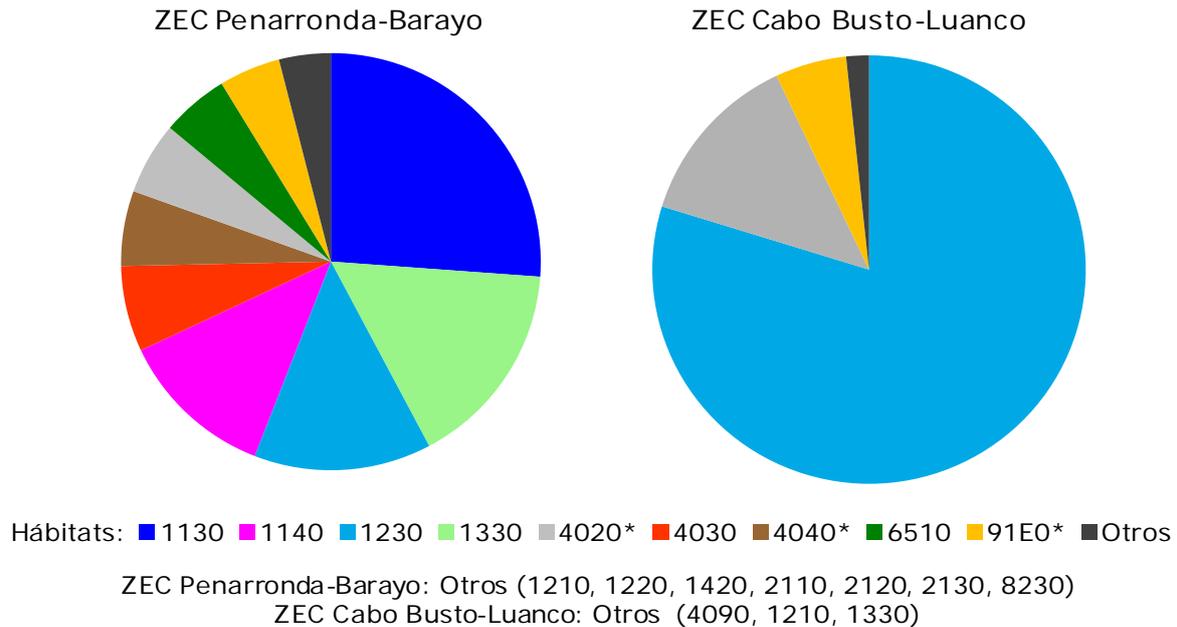


Figura 4.18. Proporción relativa de los hábitats de interés comunitario en los ZECs Penarronda-Barayo y Cabo Busto-Luanco de la zona de estudio. En "Otros" se incluyen hábitats con menos de 5 Ha.

Ambos ZECs se caracterizan también por la presencia de especies de interés comunitario según el Anexo II de la Directiva 92/43/CEE. Tanto las especies marinas como las especies que ocupan hábitats costeros cercanos al medio marino están potencialmente expuestas, en mayor o menor medida, a cambios en las dinámicas marinas y, en particular, a un incremento del nivel medio del mar (véase la tabla 4.4). Las aves del anexo I de la Directiva 2009/147/CE identificadas en las ZECs se asume que tienen un bajo grado de exposición y vulnerabilidad a los efectos del cambio climático sobre las dinámicas marinas debido a su elevada capacidad de desplazamiento.

Código Natura 2000	Especie	Nombre común	Hábitat	ZEC Penarronda-Barayo	ZEC Cabo Busto-Luanco
MAMÍFEROS					
1349	<i>Tursiops truncatus</i>	Delfín mular	Mar	x	x
1351	<i>Phocoena phocoena</i>	Marsopa común	Mar	x	x
1355	<i>Lutra lutra</i>	Nutria	Ríos y ensenadas marinas	x	x
ANFIBIOS Y REPTILES					
1259	<i>Lacerta schreiberi</i>	Lagarto verdinegro	Bosques caducifolios, matorrales, bosques de ribera, sistemas dunares	x	x
PECES					
1095	<i>Petromyzon marinus</i>	Lamprea marina	Medio marino y fluvial	x	x
1102	<i>Alosa alosa</i>	Sábalo	Medio marino y fluvial	x	
1106	<i>Salmo salar</i>	Salmón atlántico	Medio marino y fluvial	x	x

Tabla 4.4. Especies de interés comunitario (Anexo II de la Directiva 92/43/CEE) cuyo hábitat se localiza en zonas expuestas a cambios en el medio marino.

Red Regional de Espacios Naturales Protegidos

La ordenación de los espacios naturales en Asturias se rige básicamente por la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, de la Biodiversidad y de los Espacios Naturales y por la Ley autonómica 5/91 de Protección de los Espacios Naturales y el Decreto 92/1994, de 19 de mayo, que desarrolla el "Plan de Ordenación de los Recursos Naturales de Asturias" (PORN). En este contexto, se identifican tres figuras de protección regional dentro de la zona de estudio (Figura 4.19):

- Reserva Natural Parcial (RNP) de Barayo, que abarca una superficie de 344 Ha.
- Paisaje Protegido (PP) Costa Occidental, con una extensión total de 6190 Ha, de las cuales 3733 Ha se localizan dentro de la zona de estudio.
- Monumento Natural (MN) Playa de Frexulfe de 6 Ha.

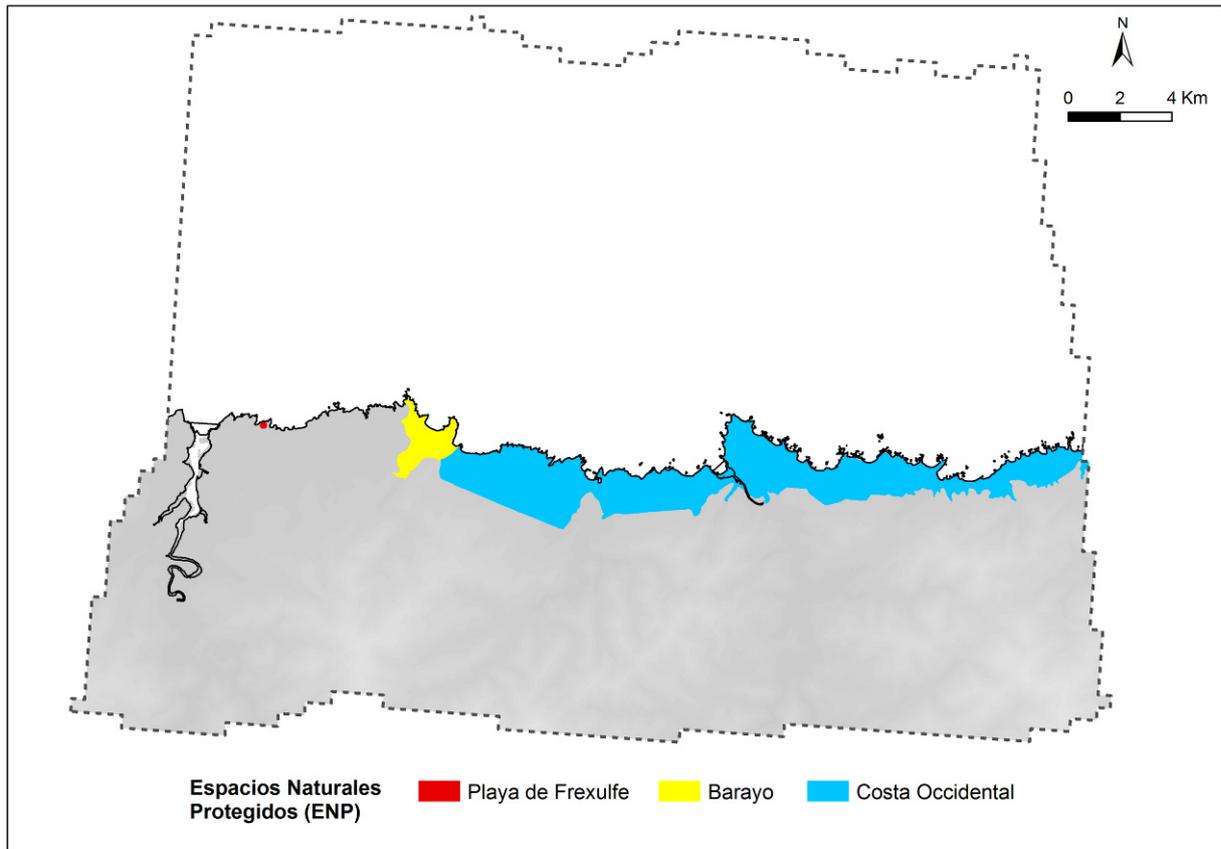


Figura 4.19. Delimitación de los espacios naturales protegidos: Playa de Frexulfe (Monumento Natural, MN), Barayo (Reserva Natural Protegida, RNP) y Costa Occidental (Paisaje Protegido, PP).

En cuanto a los hábitats EUNIS, destacar que en los tres ENPs hay una clara dominancia de los hábitats correspondientes a los bosques de coníferas (G3) y pastizales mesófilos (E2) (Figura 4.20). No obstante, es importante destacar que, en algunos casos, la cartografía disponible no permite identificar todos los hábitats representativos de los ecosistemas, especies, formaciones naturales, etc., que han motivado la protección de dichas zonas (e.g., no se reconoce la existencia de sistemas dunares en la RNP de Barayo)

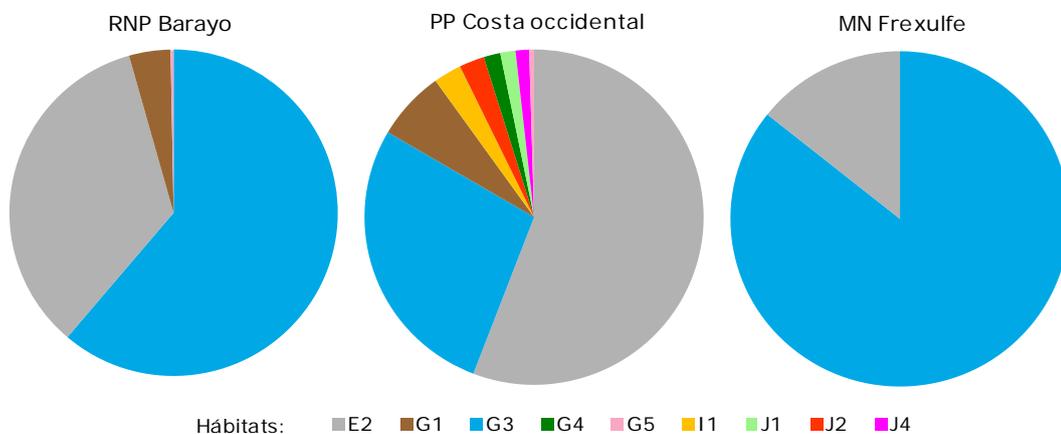


Figura 4.20. Proporción relativa de los hábitats EUNIS en los ENPs de la zona de estudio.

4.3.1.2.2. Directiva Marco del Agua

En la zona de estudio se identifican tres categorías de masas de agua de acuerdo con la DMA (Directiva Marco del Agua 2000/60/CE) (véase la figura 4.21):

- Masas de agua costeras: Costa Oeste de Asturias (superficie total de 46854 Ha, de las cuales 15492 Ha se localizan dentro de la zona de estudio) y Navia costa (341 Ha).
- Masas de agua de transición: Estuarios de Navia (282 Ha) y del Esva (411 Ha).
- Masas de agua fluviales: Embalse del Asón (superficie total de 260 Ha, de las cuales 108 Ha se localizan dentro de la zona de estudio).

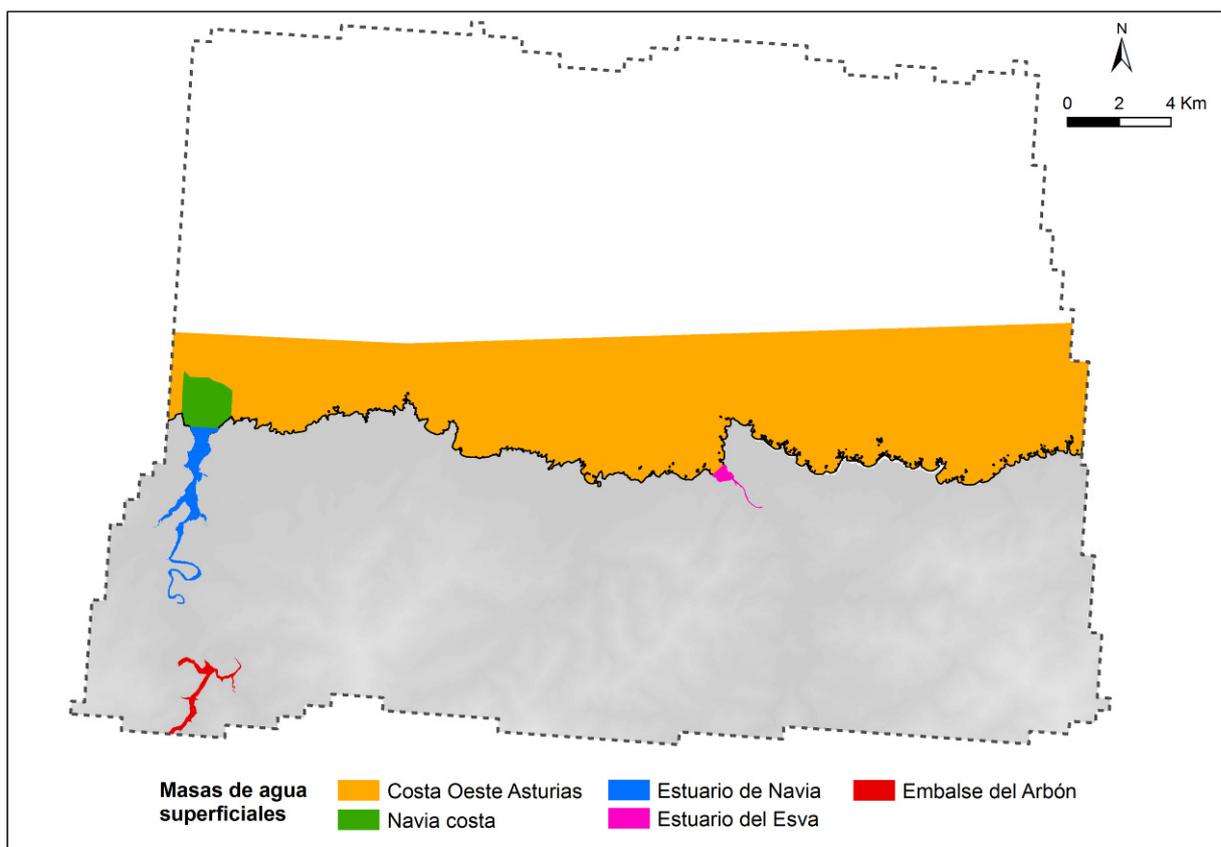


Figura 4.21. Delimitación de las masas de agua costeras (Costa Oeste Asturias y Navia Costa), de transición (Estuario de Navia y Estuario del Esva) y fluviales (Embalse del Arbón).

En la masa de agua costera “Costa Oeste de Asturias” se registra un elevado número de hábitats EUNIS marinos (11 hábitats), aunque sólo tres ocupan la mayor parte de la superficie marina. Asimismo, es de destacar que la masa de agua de transición “Estuario de Navia” es capaz de albergar un mayor número de hábitats continentales que el “Estuario del Esva”, de menor tamaño y con una fuerte dominancia de pastizales mesófilos (E2) y bosques de coníferas (G3) (véase la figura). En la masa de agua fluvial “Embalse del Arbón”, domina el hábitat de aguas estancadas (C1) y, con una menor extensión, el de los bosques plano-caducifolios (G1).

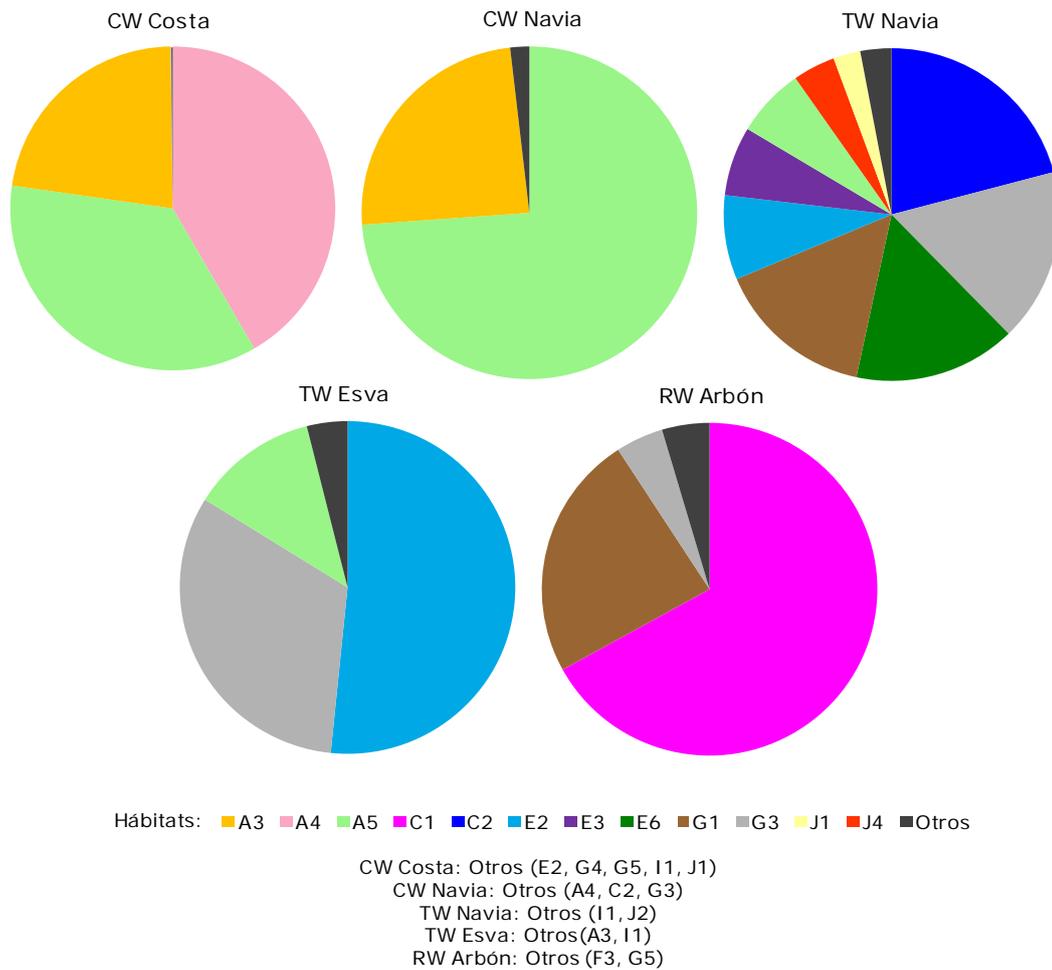


Figura 4.22. Proporción relativa de los hábitats EUNIS en las masas de agua incluidas dentro de la zona de estudio. En "Otros" se incluyen hábitats que representan menos de un 5%.

4.3.3. Impacto

Los principales impactos del aumento del nivel medio del mar sobre los hábitats y especies costeros con consecuencia del incremento de la superficie inundada en el escenario de aumento del nivel medio del mar. La distribución espacial de los hábitats y especies descritas en apartados anteriores responde al mapa de inundación obtenido para el escenario de referencia, es decir, sin considerar aumento del nivel medio del mar. Por lo tanto, la alteración de los patrones de inundación en los diferentes escenarios de cambio climático condiciona cambios en las características físicas y químicas que definen el hábitat o nicho ecológico de las especies.

4.3.3.1. Metodología

El impacto producido por la inundación de hábitats de interés comunitario no sujetos a dicha dinámica constituye un importante riesgo para el cumplimiento de la Directiva Hábitats 92/43/CEE y su integración con otra legislación comunitaria y/o regional. Por esta razón, la evaluación de los impactos sobre dichos hábitats y su variabilidad espacial constituye una tarea prioritaria para la planificación de la gestión y conservación de estos espacios.

Un indicador cuantitativo del impacto de la inundación sobre los hábitats y especies es el área total afectada. No obstante, es necesario tener en cuenta indicadores adicionales que valoren la representatividad y sensibilidad de los hábitats y especies y su variabilidad espacial. Por un lado, el impacto depende de la superficie de hábitat inundado con respecto a su extensión total dentro de la zona de estudio o figura de protección. Por otro lado, es importante caracterizar también la distribución espacial de los impactos absolutos y relativos, sobre todo como herramienta para la planificación de las medidas de adaptación y gestión.

Para la valoración de estos indicadores, se estimó la superficie de los hábitats de interés comunitario y/o hábitats EUNIS afectada por el incremento del área inundada en el escenario 5 con respecto al escenario de referencia. Dichos cálculos se realizaron considerando toda la zona de estudio y, de forma independiente, para cada una de las figuras de protección de los sistemas naturales establecidas en el marco de la Directiva Hábitat, Directiva Marco del Agua y legislación regional. Concretamente, en los espacios de la Red Natura 2000 se estimó la superficie y porcentaje relativo de hábitats de interés comunitario afectados por la inundación, mientras que en el resto de figuras de protección dicho análisis se realizó con los hábitats establecidos según la clasificación EUNIS.

4.3.3.2. Resultados

4.3.3.2.1. Impacto global

En el escenario 5 de cambio climático, el aumento del nivel medio del mar da lugar a un incremento de la superficie inundada de 87 Ha, afectando a un total de 30 hectáreas de hábitats EUNIS (véase la figura). La mayor superficie de hábitat inundado se corresponde con los bosques de coníferas (G3) y, en menor medida, con los pastizales mesófilos (E2), húmedos (E6) y estepas halófilas continentales (E3).

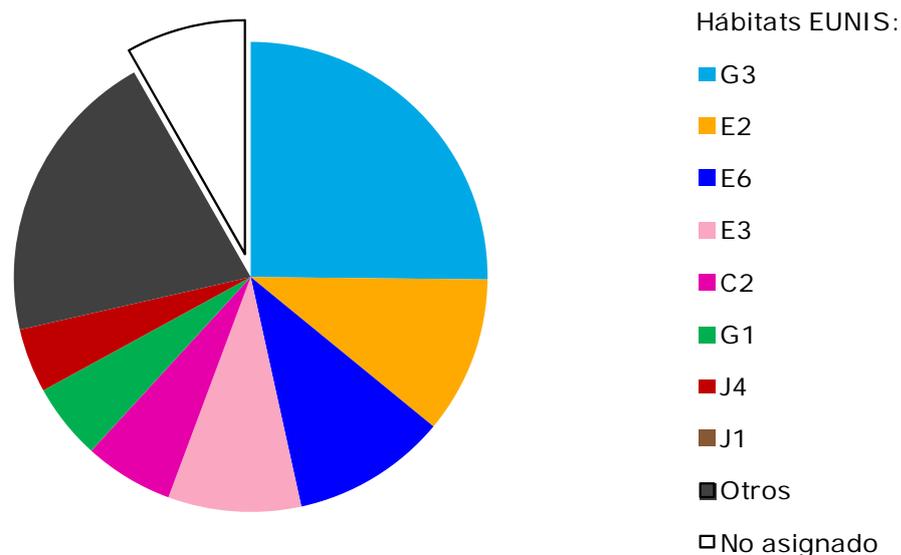


Figura 4.23. Proporción del área afectada por el incremento de la inundación (escenario 5) que se corresponde con hábitats EUNIS. En "Otros" se incluyen los hábitats que representan menos de un 5% del área inundada. En "No asignado" se incluyen zonas que no albergan ninguno de los hábitats considerados.

Un total de 12 hábitats EUNIS se ven directamente afectados por el aumento del nivel medio del mar (véase la figura 4.24). Los cambios más significativos se producen en las estepas halófilas continentales (E6) y en los bosques de coníferas (E3), cuya superficie se ve afectada en un 22% y 19% del área total que cubren cada uno de ellos, lo cual representa una superficie de 10.9 y 9.4 Ha, respectivamente. En menor medida, también se ven inundados los hábitats correspondientes a los ríos y arroyos (C2) y a las construcciones y hábitats artificiales (J1, J2 y J4) (<10% de su superficie). En términos de extensión, la mayor superficie de hábitat artificial afectada se asocia a redes de transporte (J4) y se cuantifica en aproximadamente 4.6 Ha. El resto de hábitats sujetos a la influencia del aumento del nivel medio del mar sólo presentan impactos en un porcentaje de su superficie muy bajo (>0.22%), aunque el número de hectáreas afectadas es variable (0.3-26.0 Ha).

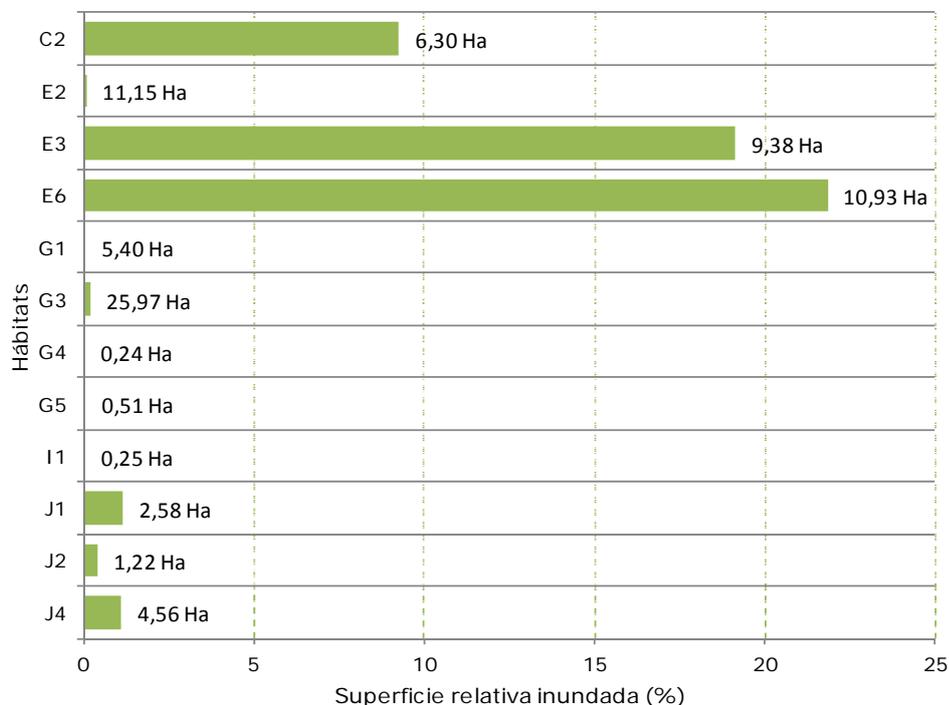


Figura 4.24. Superficie relativa de cada hábitat EUNIS (%) y superficie total (Ha) afectada por el incremento de la inundación en el escenario 5.

4.3.3.2.2. Impacto sobre los espacios protegidos

En los siguientes apartados se analiza el impacto del aumento del nivel medio del mar sobre las diferentes figuras de protección establecidas dentro del marco de la Red Natura 2000, Directiva Marco del Agua y espacios naturales protegidos.

Zonas Especiales de Conservación (ZEC)

Las dos ZECs incluidas en la zona de estudio albergan una composición, distribución y extensión relativa de los hábitats de interés comunitario diferente, lo cual determina el riesgo de incumplimiento de la Directiva 92/43/CEE y los impactos sobre su estado de conservación como consecuencia del aumento del nivel medio del mar.

El ZEC Penarronda-Barayo alberga un gran número de hábitats de interés comunitario y la mayoría de ellos se ven afectados por el incremento de la inundación asociada al escenario 5. En concreto, se inundan 12 hábitats (véase la figura 4.25). El hábitat más afectado es el de los pastizales salinos atlánticos (1330) (20.0 Ha, que representan un 40% de su superficie total dentro del ZEC y de la zona de estudio). Además, el incremento de la inundación afecta a más del 5% de la superficie de 6 hábitats, uno de ellos prioritario (Bosques aluviales, 91E0). Otro hábitat prioritario afectado es el de los brezales secos atlánticos costeros de *Erica vagans* (4040), aunque en menor medida (3% de su superficie, 0.43 Ha).

La zona del ZEC Cabo Busto-Luanco que se incluye dentro del área de estudio alberga una menor riqueza de hábitats de interés comunitario, 6 hábitats, de los cuales 5 están directamente expuestos a incrementos en el aumento del nivel medio del mar (Figura 4.25 la figura 4.25). Los hábitats de vegetación anual sobre desechos marinos acumulados (1210) y de bosques aluviales (91E0), que es un hábitat prioritario, experimentan impactos por la inundación en un 14 y 12% de su superficie, respectivamente. Estos porcentajes relativos se corresponden con áreas inundadas de 2.4 Ha del hábitat 1210 y 0.53 Ha del hábitat 91E0. En los tres hábitats restantes, acantilados con vegetación de las costas atlánticas (1230), brezales húmedos atlánticos de zonas templadas de *Erica ciliaris* y *Erica tetralix* (4020) y brezales oromediterráneos endémicos con aliaga (4090), la máxima superficie inundada es inferior al 5% y 0.5 Ha.

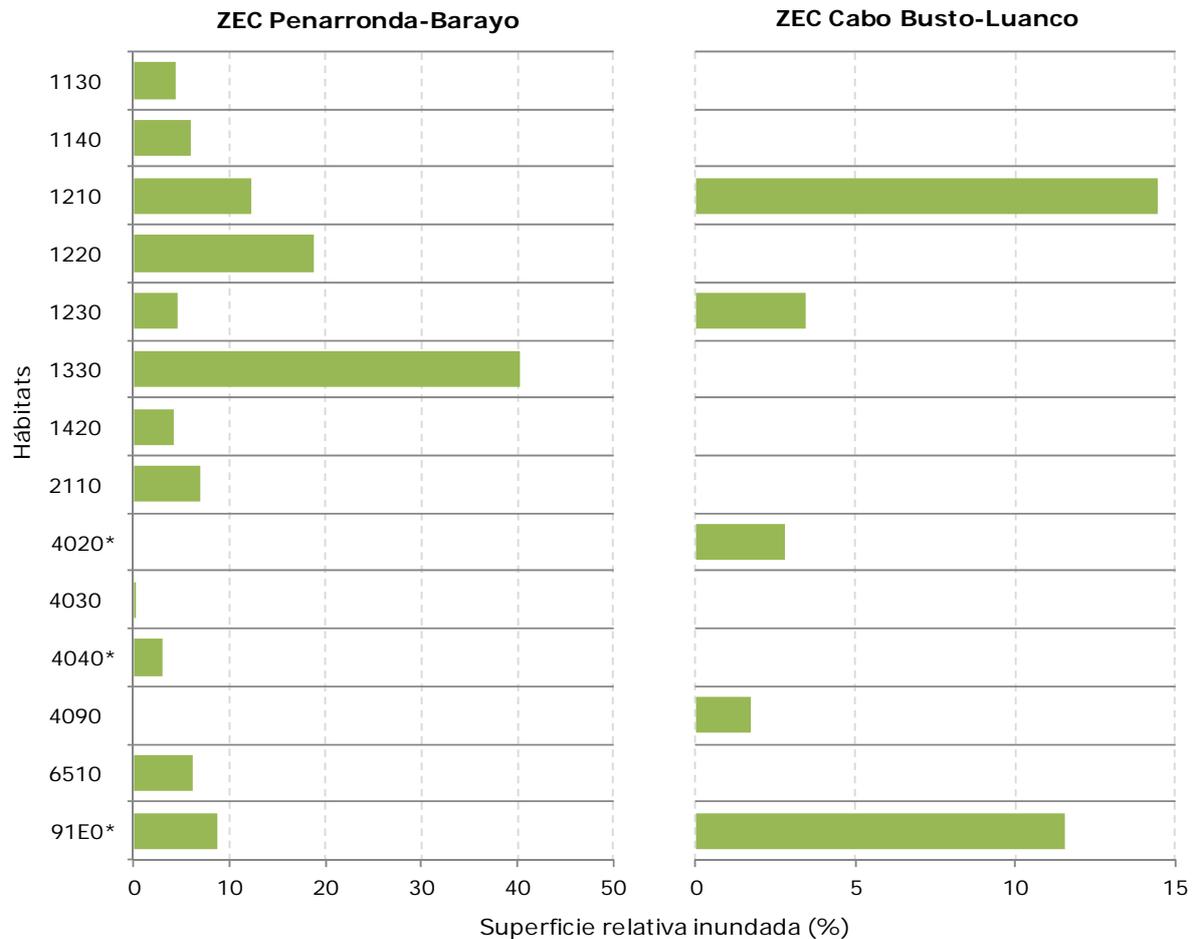


Figura 4.25. Superficie relativa de cada hábitat de interés comunitario (%) y superficie total (Ha) afectada por el incremento de la inundación en el escenario 5 en los ZECs Penarronda-Barayo y Cabo Busto-Luanco.

Red regional de espacios naturales protegidos

En la zona de estudio se identifican tres espacios naturales protegidos dentro de la red regional. Cada uno de estos espacios muestra unas características físicas y biológicas diferentes que se asocian con una determinada composición de hábitats EUNIS y que determina su exposición y vulnerabilidad frente al aumento del nivel medio del mar. A continuación se detallan los impactos potenciales en cada uno de dichos espacios.

En la Reserva Natural Parcial de Barayo, tres hábitats EUNIS experimentan impactos por la inundación generada por el aumento del nivel medio del mar (véase la figura 4.26). Dichos hábitats se corresponden con bosques (G3 y G5) y pastizales (E2). En todos los casos, el porcentaje relativo de hábitat inundado es inferior al 9%, lo cual representa una superficie inferior a 6 Ha.

En el Paisaje Protegido Costa Occidental la inundación afecta a 8 hábitats, aunque todos ellos muestran un grado de afección bajo (menos del 3% de su superficie) (véase la figura 4.26). Los hábitats inundados pertenecen a bosques (G), construcciones y hábitats artificiales (J) y pastizales (E). Las mayores extensiones de hábitat afectado son 8.5 Ha de bosques de coníferas (G3) y 4.1 Ha de pastizales mesófilos (E2).

El Monumento Natural de La Playa de Frexulfe sólo muestra impactos por aumento del nivel medio del mar en uno de los dos hábitats continentales que alberga según la cartografía EUNIS utilizada: bosques de coníferas (G3) (véase la figura 4.26). Además, dicho impacto afecta al 1.3% de la superficie cubierta por dicho hábitat, lo cual representa 0.08 Ha aproximadamente.

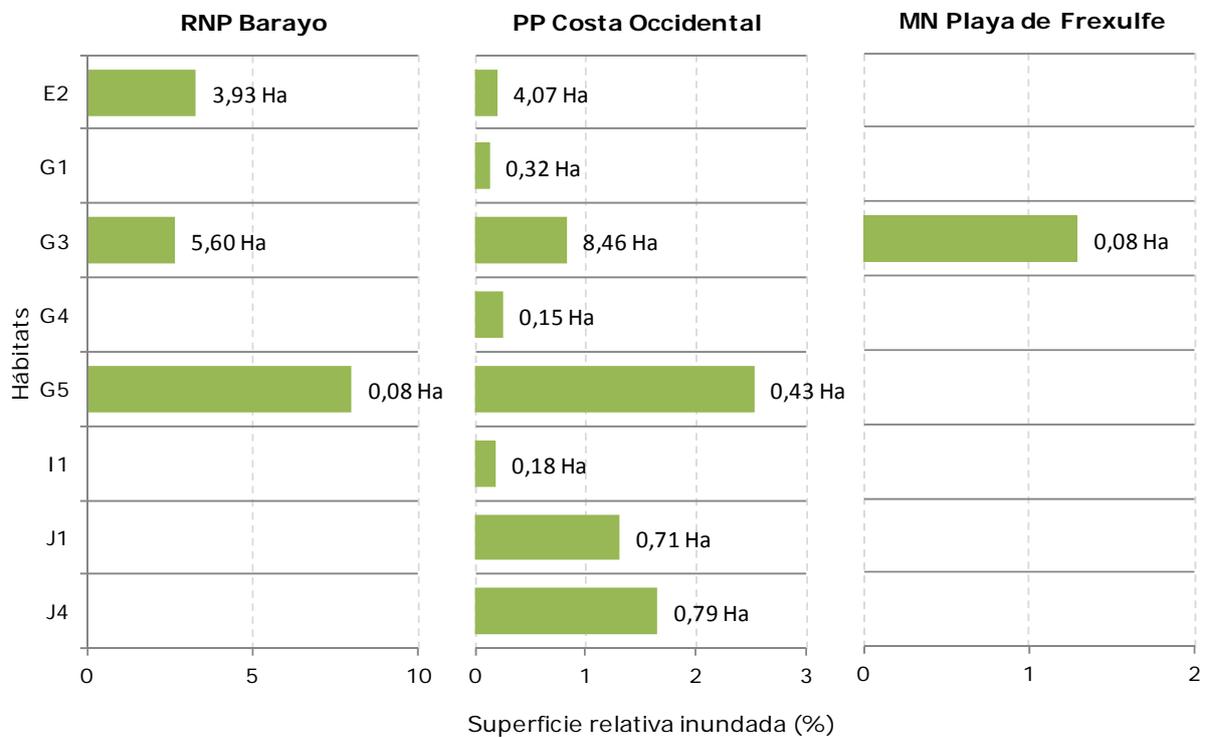


Figura 4.26. Superficie relativa de cada hábitat EUNIS (%) y superficie total (Ha) afectada por el incremento de la inundación en el escenario 5 en los espacios naturales protegidos de Barayo, Costa Occidental y Playa de Frexulfe.

Masas de agua según la DMA

En el contexto del DMA, las masas de agua de transición son las principales afectadas por el incremento de la inundación como consecuencia del cambio climático. Dichas masas de agua se caracterizan por albergar amplias zonas intermareales en la zona de estudio que ven modificado su hidoperíodo al aumentar el nivel medio del mar.

En la zona de estudio, el estuario de Navia es la masa de agua de transición de mayor tamaño y es capaz de albergar un gran número de hábitats que están potencialmente expuestos al aumento del nivel medio del mar. La inundación en el escenario 5 afecta a un total de 9 hábitats, desde bosques (G) hasta zonas urbanizadas (J), pasando por pastizales (E) y ríos y arroyos (C2) (Figura 4.27 la figura 4.27). La proporción de superficie de cada hábitat afectada alcanza valores del 21-34% en el caso de las zonas urbanizadas con construcciones y otros hábitats artificiales (J1, J2 y J4), aunque la extensión total es de 2-5 Ha.

El estuario del Esva es una entidad de menor tamaño que el de Navia y alberga un menor número de hábitats. El impacto del aumento del nivel medio del mar se detecta en un 8-12% de la superficie de 3 hábitats. El hábitat más afectado se corresponde con el de los bosques de coníferas (G3), en términos relativos (12%), y con redes de transporte (J4), en términos absolutos (1.33 Ha). En menor medida, el aumento del nivel medio del mar conlleva la inundación de los hábitats correspondientes a pastizales mesófilos (E2) (8% de su superficie que se corresponde con 0.10 Ha).

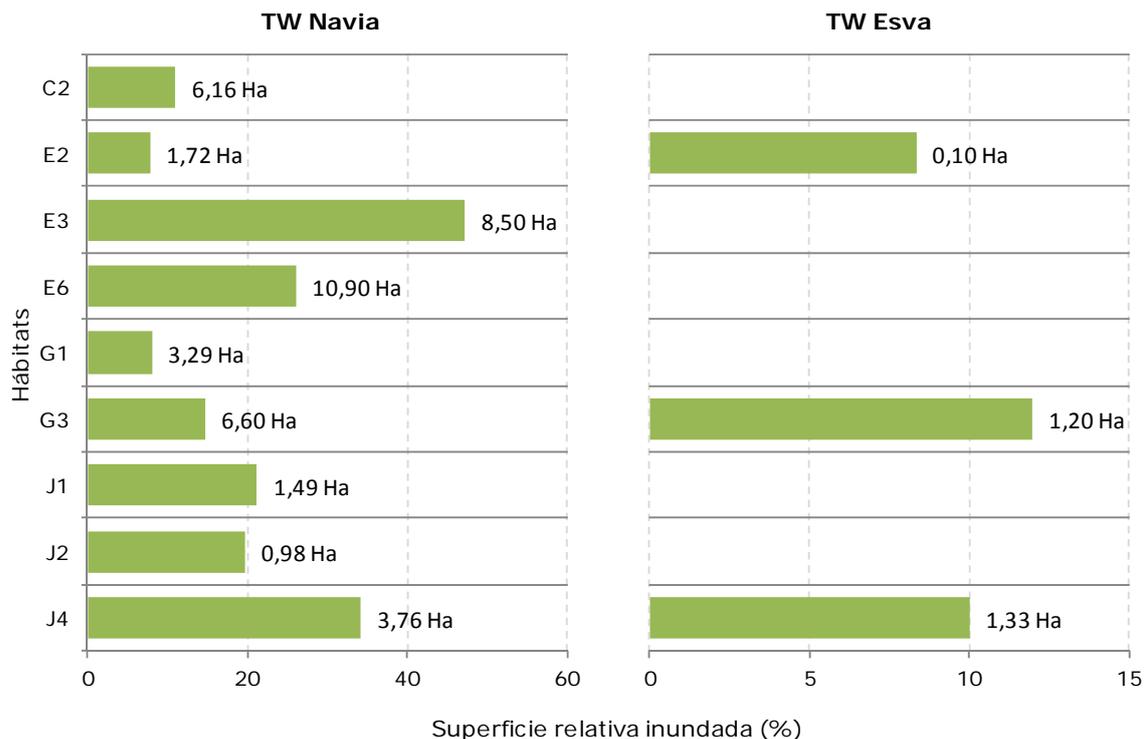


Figura 4.27. Superficie relativa de cada hábitat EUNIS (%) y superficie total (Ha) afectada por el incremento de la inundación en el escenario 5 en las masas de agua de transición Estuario del Navia y Estuario del Esva.

4.3.3.2.3. Variabilidad espacial de los impactos

Los impactos más significativos se detectan en las masas de agua de transición y en determinados espacios naturales protegidos localizados dentro de Zonas de Especial Conservación. Este es el caso del estuario Navia y de la Reserva Natural Parcialde Barayo que se incluyen dentro del ZEC Penarronda-Barayo. Estos ecosistemas se caracterizan por una alta exposición, de acuerdo con su localización en zonas de baja altitud, y por una alta vulnerabilidad, ya que son espacios con figuras de protección asociadas, frente a los efectos del incremento del nivel medio del mar (véase la figura 4.28).

Ambos espacios se caracterizan por la presencia de aguas de transición, que son sistemas que favorecen la penetración del agua marina y, por tanto, de los impactos asociados al aumento del nivel medio del mar en zonas continentales más interiores y alejadas de la costa (véase la figura 4.29). De esta forma, algunos hábitats localizados en zonas menos expuestas son potencialmente inundables. Tanto en Barayo como en el estuario de Navia las mayores extensiones de hábitat inundado corresponden a los pastizales salinos atlánticos (1330). En el caso de Barayo, la inundación de ciertos

hábitats representativos (*i.e.*, sistemas dunares formados por el hábitat de interés comunitario 2110, que se corresponde con dunas móviles embrionarias) de dicho espacio protegido pondría en riesgo la conservación de los bienes y valores que justifican su declaración como espacio natural protegido (véase la figura 4.30).

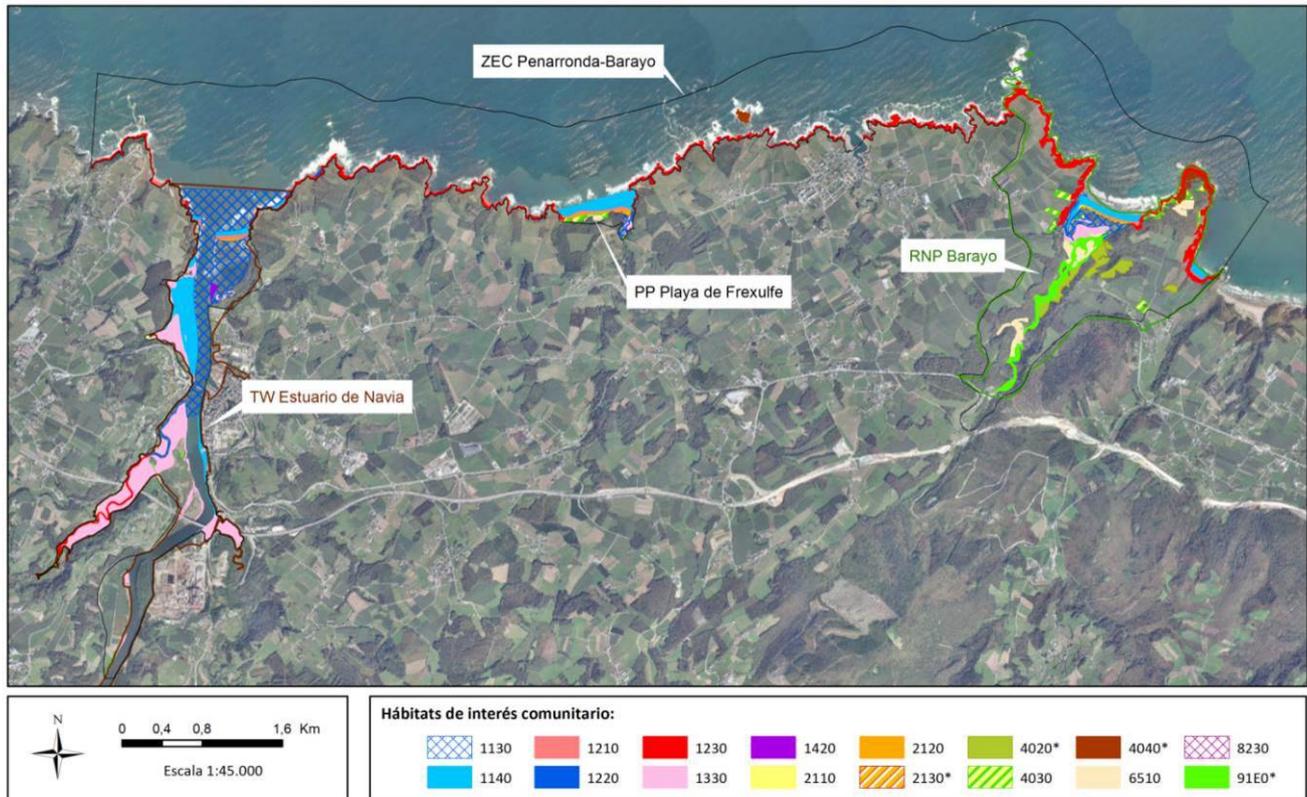


Figura 4.28. Distribución de los hábitats de interés comunitario en el ZEC Penarronda Barayo, que alberga las aguas de transición de Navia, la playa de Frexulfe y la Reserva de Barayo.

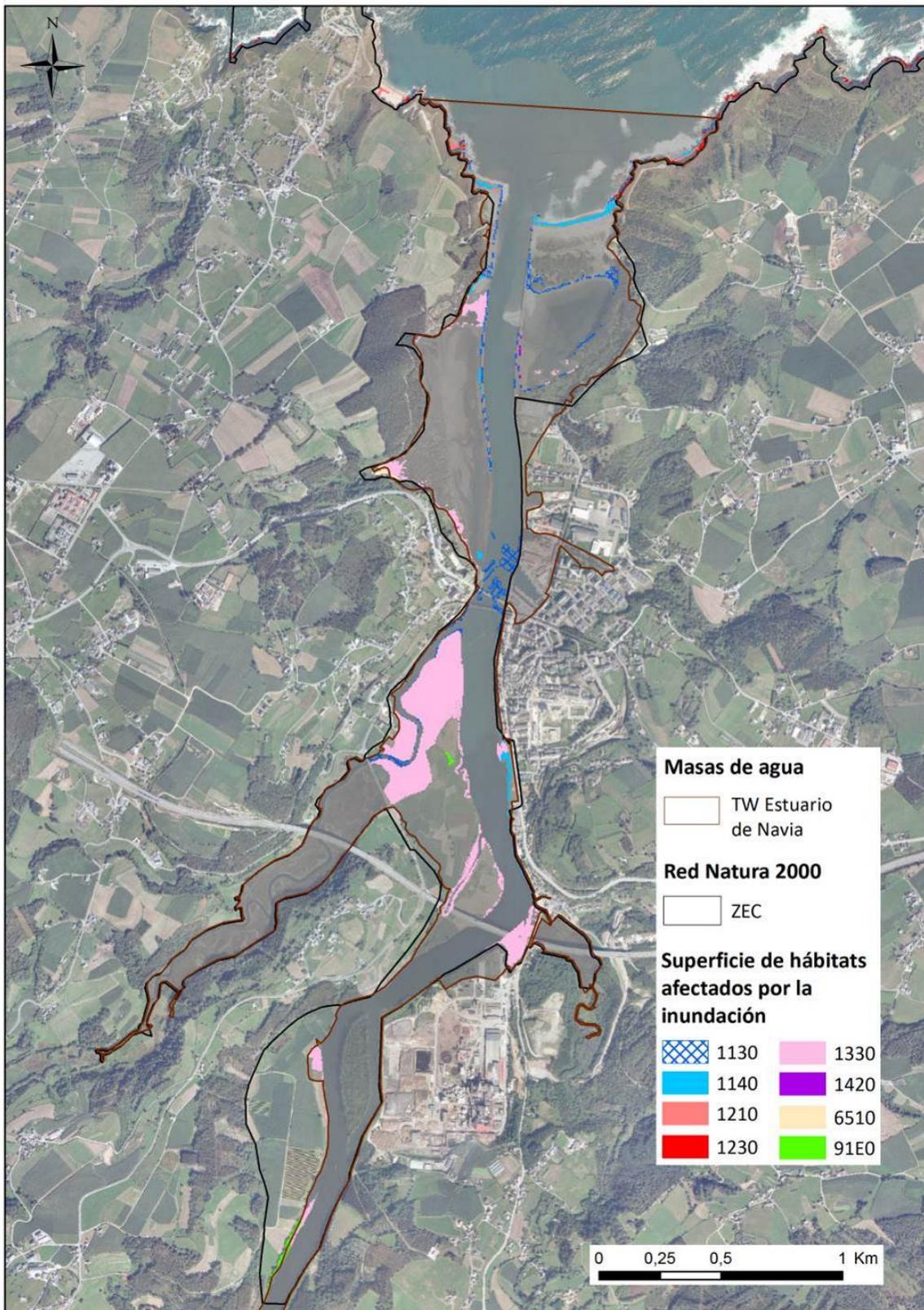


Figura 4.29. Superficie de hábitats de interés comunitario afectados por la inundación (escenario 5) en la TW Estuario de Navia, que forma parte del ZEC Penarronda-Barayo.

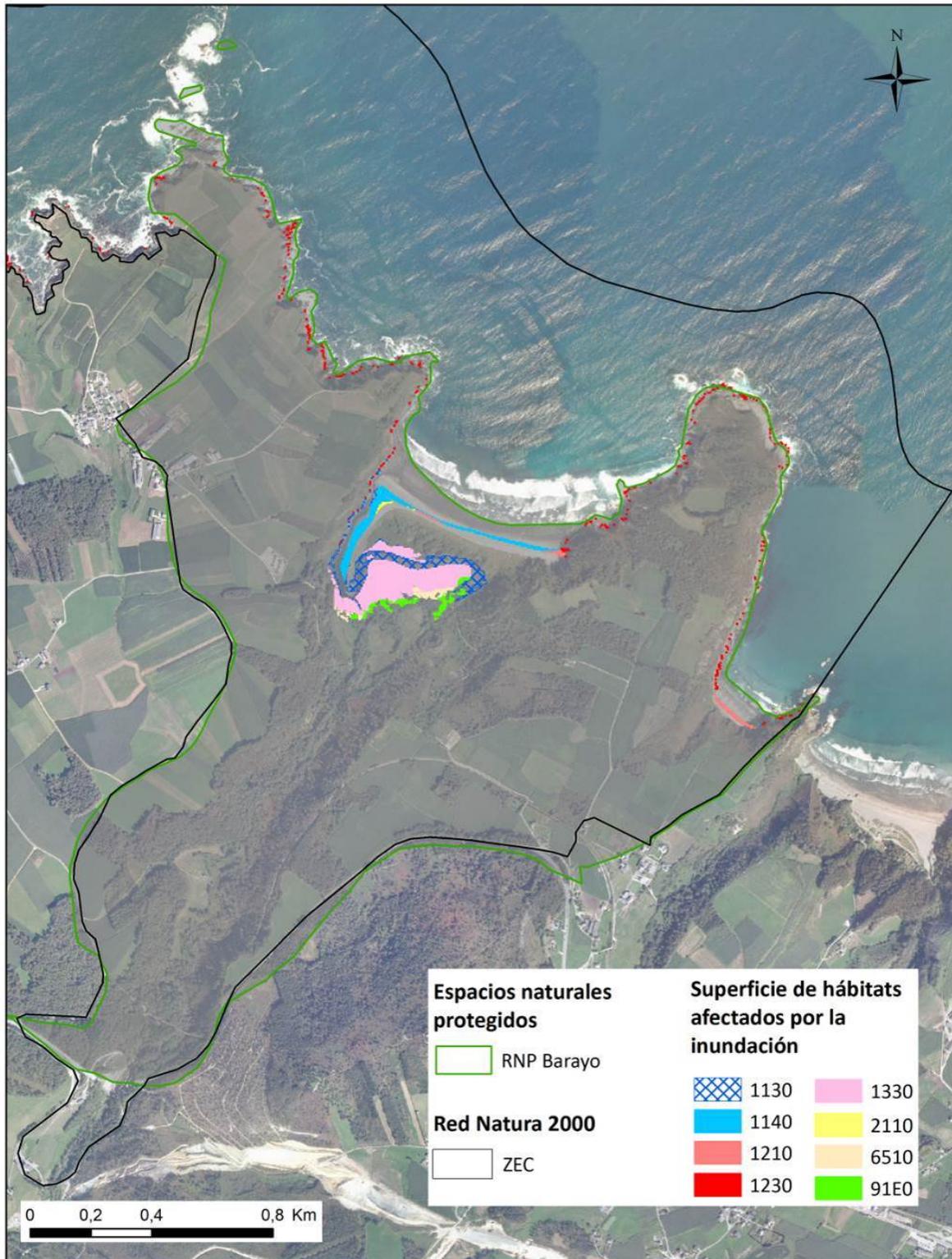


Figura 4.30. Superficie de hábitats de interés comunitario afectados por la inundación (escenario 5) en la RNP Barayo, que forma parte del ZEC Penarronda-Barayo.

Los impactos sobre los hábitats están directamente relacionados con la magnitud del incremento del nivel medio del mar considerado. A mayor superficie relativa de hábitat afectado por la inundación, mayor es el impacto sobre el estado de conservación de los ZECs. En el caso del ZEC Penarronda-Barayo se identifican hábitats en zonas estuarinas con casi el 50% de su superficie afectada (véase la figura 4.31). Por el contrario, las zonas costeras directamente expuestas a las dinámicas marinas se asocian con hábitats cuyo grado de afección es relativamente bajo, con un área inundada inferior al 5 ó 10% de su superficie. En el ZEC Cabo Busto-Luanco dominan este tipo de hábitats que experimentan un impacto mayor, es decir, no se identifican hábitats afectados en más de un 20% de su superficie.

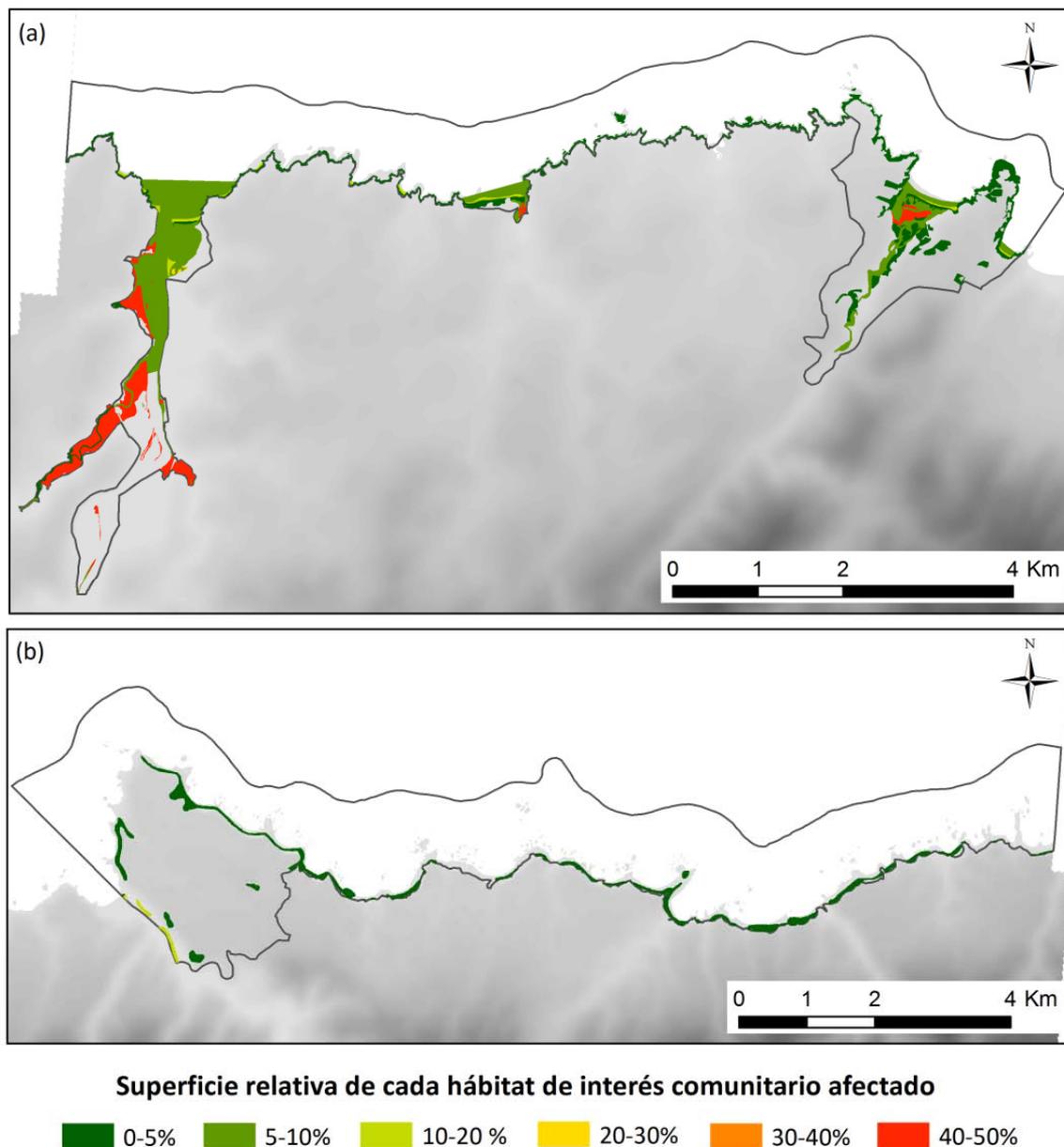


Figura 4.31. Superficie relativa de cada hábitat de interés comunitario afectada por el incremento de la inundación (escenario 5) en los ZECs (a) Penarronda-Barayo y (b) Cabo Busto-Luanco.

4.4. Impactos del aumento de la temperatura del mar sobre los ecosistemas

Dada la estrecha relación existente entre la distribución de las comunidades y las especies con las condiciones de su entorno físico, expresadas por ejemplo en función de variaciones de temperatura (van den Hoek, 1982a, b), radiación y exposición al oleaje (Luning, 1990), los cambios en los "forzamientos físicos" del medio son considerados a menudo responsables de los cambios en la estructura biológica, en el funcionamiento y en la diversidad de ecosistemas enteros (Steele and Henderson, 1994). Al mismo tiempo, estos sistemas van a estar sometidos, a medio-largo plazo, a una creciente variabilidad espacio temporal debida a las posibles alteraciones climáticas derivadas del cambio global. De este modo, la información sobre la distribución actual y la tendencia en la distribución futura representa un recurso imprescindible a la hora de tomar decisiones en la gestión del ecosistema costero.

En concreto, en la costa del Cantábrico existen evidencias de que el cambio climático está generando modificaciones tangibles en las condiciones de las aguas superficiales del Cantábrico, como es el aumento de la temperatura (Díez et al., 2012). Distintos estudios llevados a cabo en los últimos años plantean la reducción del ámbito geográfico de especies boreo-atlánticas (laminarias y Fucáceas) y la disminución de su capacidad productiva (Alock, 2003; Lamela et al., 2012; Martínez, 2012; Voerman et al., 2013), así como un aumento de especies calcáreas, meridionales e invasoras (Díez et al., 2012).

Resulta, por lo tanto, necesario tratar de establecer modelos dinámicos de hábitats potenciales en el ambiente costero, que tengan en cuenta la variabilidad espacial y temporal de las características físicas y su relación con las comunidades biológicas que colonizan dicho entorno. De esta forma se podrán abordar criterios de evaluación y diagnóstico precisos de su estado de conservación que, en última instancia, permitan una gestión sostenible de los mismos. En síntesis, nuestra capacidad de prever los posibles cambios que puedan ocurrir en los sistemas costeros de Asturias requiere el uso de herramientas que, basándose en el conocimiento pasado y en la experimentación, permitan reducir la elevada incertidumbre asociada a las predicciones actuales de cambio, utilizando modelos estadísticos.

Para llevar a cabo este análisis, se han considerado dos aproximaciones. En primer lugar se ha evaluado el efecto que el aumento de la temperatura tiene sobre las tipologías ecológicas definidas para la región Cantábrica, y sus repercusiones en la costa de Asturias. Posteriormente, se ha llevado a cabo un ejercicio para determinar en qué medida el incremento de temperatura previsto afectará a la distribución de las especies. En concreto, se ha analizado la posible evolución del alga roja *Gelidium corneum* (ocle), que se explota comercialmente para la extracción de agar-agar y constituye un importante recurso natural en la región.

4.4.1. Regiones biogeográficas

Como se ha comentado anteriormente, en este apartado se ha evaluado el efecto que el aumento de la temperatura tiene sobre las tipologías ecológicas definidas para la región Cantábrica, y sus repercusiones en la costa de Asturias. En concreto, se ha realizado un análisis de sensibilidad para evaluar el efecto del aumento de la temperatura máxima en la distribución biogeográfica potencial de las especies de macroalgas características de la zona de estudio. Para ello, se han considerado las tipologías ecológicas (regiones biogeográficas) establecidas por Ramos et al. (2015) a lo largo de la cornisa Cantábrica.

4.4.1.1. Exposición

Las clasificaciones ecológicas son una herramienta útil de predicción para la evaluación y conservación del medio marino. En este sentido, el estudio llevado a cabo a lo largo del Norte y Noroeste de la Península Ibérica por Ramos et al. (2015) permitió caracterizar la distribución de variables ambientales y bióticas a escala regional. Así, se obtienen tipologías ecológicas basadas en datos físicos y asociadas a la distribución de comunidades de macroalgas intermareales.

En este estudio la línea de costa se dividió en 41 tramos de 20 km, calculando las variables abióticas en los puntos centrales de cada uno de estos tramos proyectados en una línea a 150 m de profundidad. A continuación, las variables físicas (SST máxima y mínima, exposición al oleaje, amplitud de marea media y PAR medio y mínimo) se analizaron combinando dos técnicas: Self-Organizing Map (SOM, Kohonen, 2000) y el algoritmo k-medias. Como resultado de dicha clasificación se obtuvieron cuatro tipologías (véase la figura 4.32):

- Rías Bajas: caracterizada por la menor amplitud de marea y SST máxima y mayor SST mínima y radiación.
- Rías Altas: presenta los valores máximos de altura de ola.
- Cantábrico Oeste: este es un grupo de transición con datos físicos entre la parte este y oeste de la zona de estudio.
- Cantábrico Este: se caracteriza por la menor altura de ola, SST mínima y radiación solar media, y mayor amplitud de marea y SST máxima.

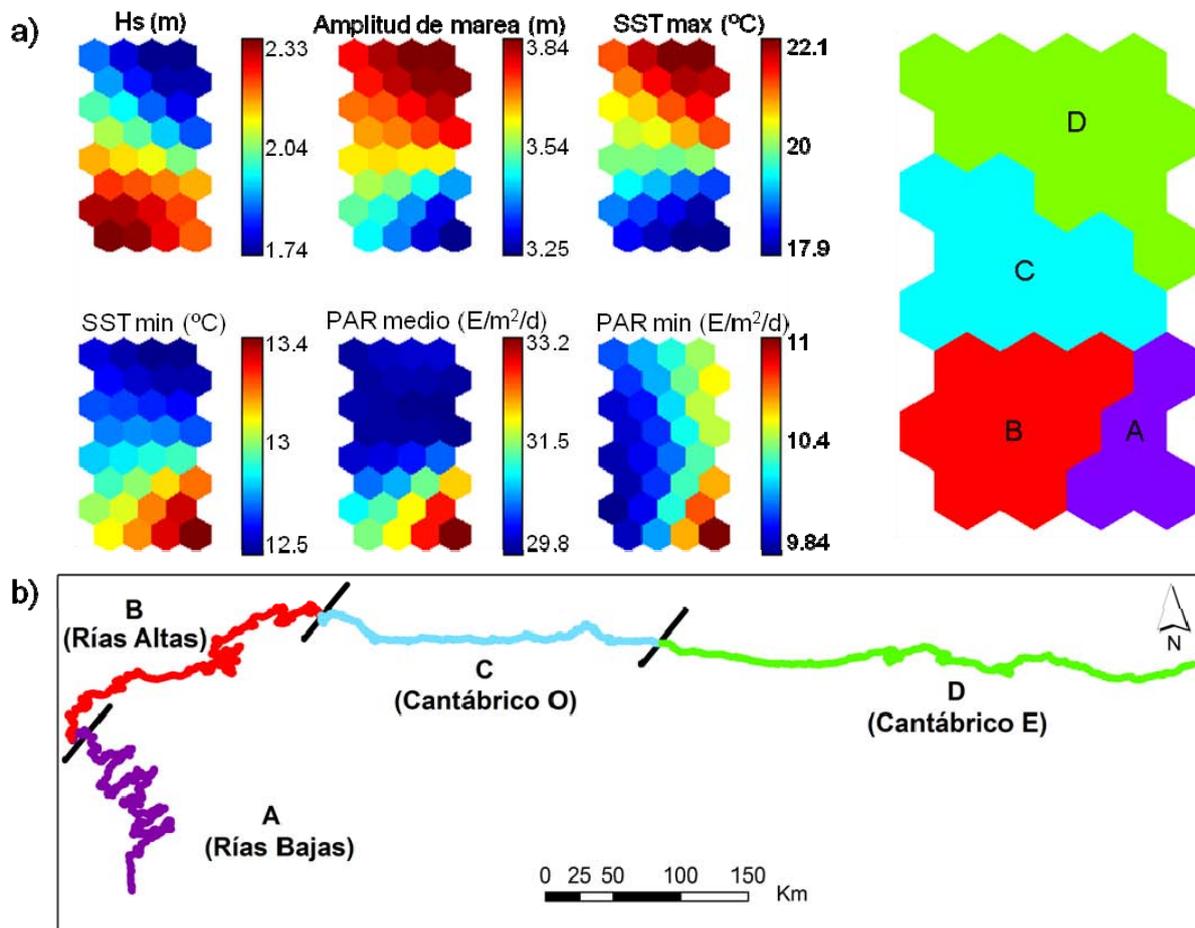


Figura 4.32. (a) A la izquierda, gradiente de cada una de las variables físicas incluidas en el análisis SOM. A la derecha, resultados del k-medias en el mapa de la SOM. (b) Mapa de las tipologías obtenidas en la clasificación física. Fuente: Ramos et al. (2015).

4.4.1.2. Impactos

4.4.1.2.1. Metodología

Para probar la habilidad de la clasificación de predecir el efecto del cambio climático sobre la distribución de especies se ha realizado un análisis de sensibilidad, proporcionando el conocimiento sobre como el modelo responde a los cambios en las variables utilizadas como *input* (Saltelli et al., 2004). Esta información sobre el comportamiento del modelo permite identificar las regiones más sensibles al cambio en la temperatura.

El análisis de sensibilidad se ha centrado en la temperatura superficial del agua máxima, ya que presenta un rango de variación mayor que la temperatura mínima a lo largo del área de estudio y determina en mayor medida la distribución de especies en la cornisa Cantábrica (Voerman et al., 2013; Ramos et al., 2015).

Para llevar a cabo el análisis, los valores de SST máxima se han incrementado en cada punto de acuerdo a los resultados de proyecciones de cambio climático explicados anteriormente. Con estos valores se ha creado una nueva base de datos de las variables físicas. Los nuevos puntos se han relacionado con los valores de cada neurona del SOM

inicial a través de distancias euclídeas. Cada punto se asocia con la neurona con la que presenta menores distancias. De este modo se obtiene la nueva tipología en la que se encontraría cada tramo de 20 km de costa de acuerdo a los cambios en la temperatura superficial del agua máxima.

En aquellos casos en los que la distancia euclídea mínima es mayor de 0.7 se ha considerado que dichos puntos difieren demasiado de la neurona y grupo inicial para ser asociados a estos. Al no poder ser incluidos en ninguno de los grupos iniciales estos puntos se han agrupado en una nueva tipología, teniendo en cuenta que presenten valores similares respecto a las variables físicas.

4.4.1.2.2. Resultados

Como se puede observar en la Figura 4.33, incluso con el menor de los incrementos en la temperatura máxima (escenario 4.5, medio plazo) la tipología a la que pertenece la zona central de Asturias se ve modificada. En el escenario más pesimista (RCP 8.5) a largo plazo, se producen los mayores cambios en las tipologías, mostrando así el sistema de clasificación la mayor sensibilidad al cambio en temperatura. En este caso, la costa Asturiana que cambia de tipología se extiende hacia el oeste, cambiando además el interior del Golfo de Vizcaya y una zona mayor en el norte de las Rías Altas. Por lo tanto, una de las zonas más afectadas por el incremento en temperatura según el análisis de sensibilidad sería la costa de Asturias.

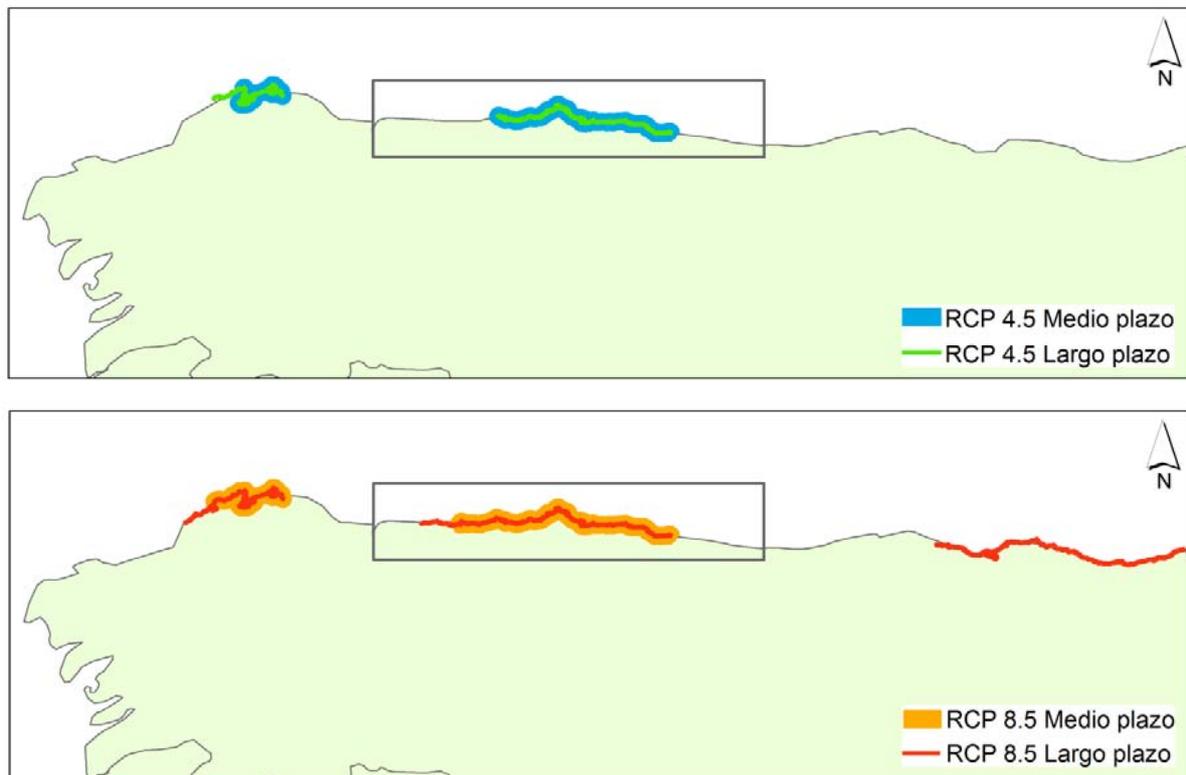


Figura 4.33. Análisis de sensibilidad al incremento de temperatura en el sistema de clasificación. Los diferentes colores representan los tramos que cambian de tipología de acuerdo a los diferentes escenarios y plazos temporales. Superior: RCP 4.5. Inferior: RCP 8.5.

Los cambios detectados no son iguales en todas las tipologías (Figura 4.34). La zona de transición Cantábrico Oeste (C) disminuye al aumentar el plazo temporal y modificar el escenario climático hacia uno más pesimista, llegando a disminuir desde 11 a 7 tramos (80 km) en el caso más extremo. Lo mismo sucede con la tipología Rías Altas (B), aunque en este caso la reducción es menor. Por el contrario, la tipología más oriental, Cantábrico Este (D), aumenta en extensión de forma significativa. En el escenario RCP 8.5 a largo plazo el número de tramos de esta tipología disminuye, pero esta disminución se debe a la segregación de los tramos más orientales por sus altos valores de distancia euclídea en una nueva tipología (E).

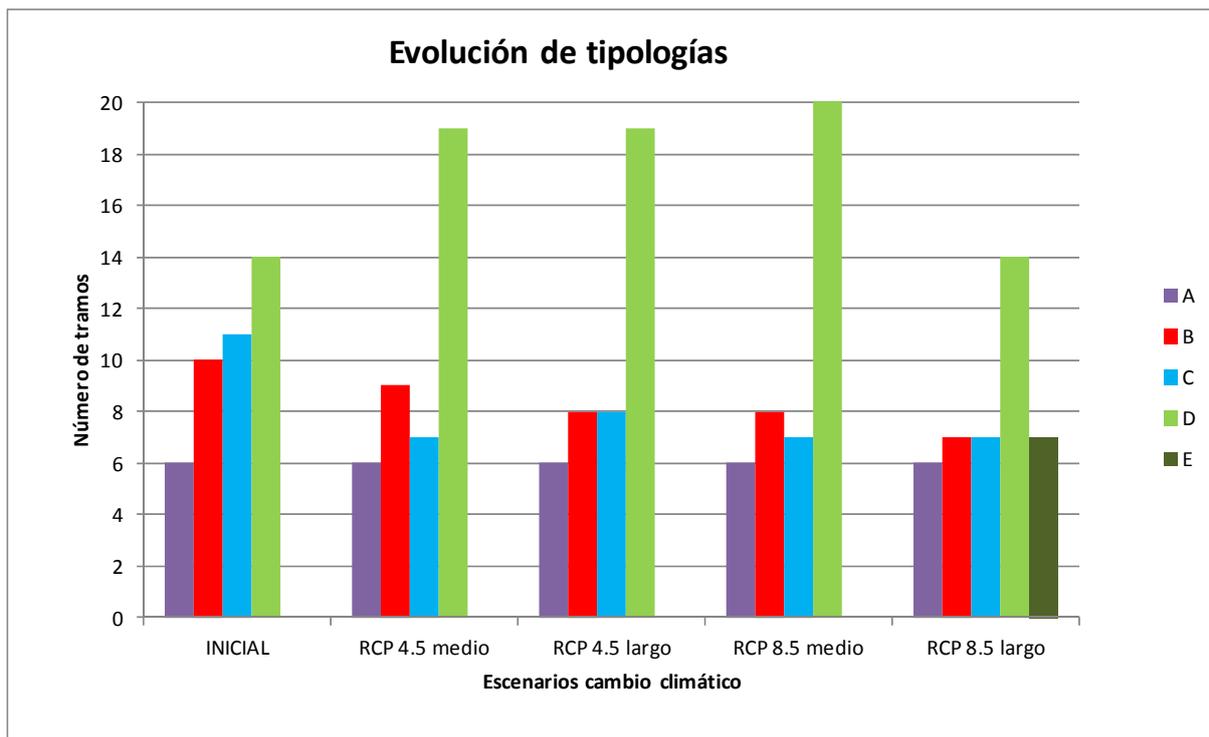


Figura 4.34. Evolución del número de tramos que pertenecen a cada tipología para los diferentes escenarios y periodos temporales.

En el escenario de cambio climático RCP 4.5 la tipología Cantábrico E se extiende hacia el oeste, pasando la zona de Cabo Peñas (Figura 4.35). Se reduce así la tipología de transición Cantábrico O con características físicas y biológicas intermedias, mientras que aumenta el grupo con especies de macroalgas características de aguas cálidas y latitudes más bajas. Por otra parte, la tipología Rías Altas ve ligeramente disminuida su extensión debido al aumento hacia el oeste de la tipología Cantábrico O, reduciéndose el grupo caracterizado por la mayor exposición al oleaje y menores temperaturas máximas con especies de macroalgas de aguas templado-frías más similares a las del norte de Europa (Ramos et al., 2015).

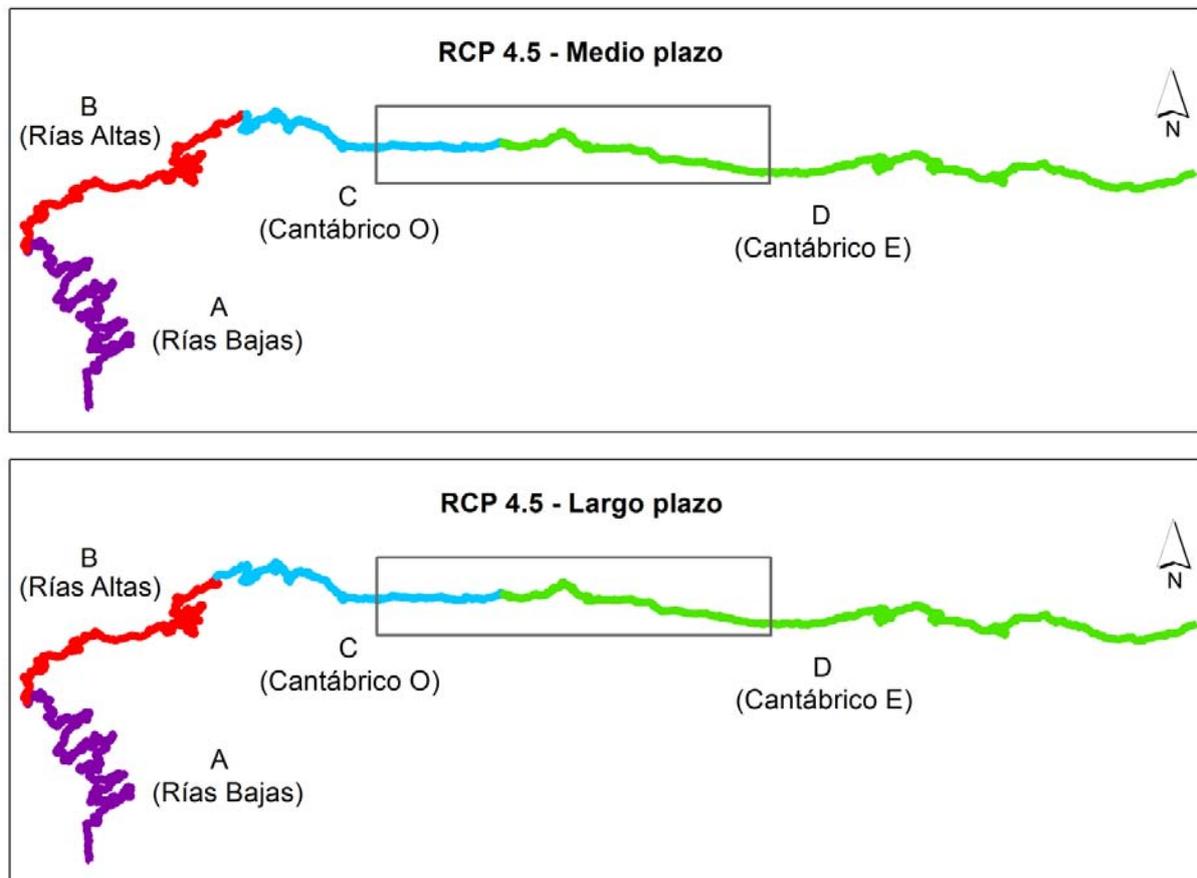


Figura 4.35. Tipologías obtenidas para el escenario de cambio climático RCP 4.5. Superior: medio plazo. Inferior: largo plazo.

En el caso del escenario de cambio climático más pesimista (RCP 8.5), para el medio plazo los cambios son similares a los detectados anteriormente en el largo plazo para el escenario 4.5 (Figura 4.36). Sin embargo, para el largo plazo se observan cambios de mayor magnitud. En primer lugar, la tipología Cantábrico E se extiende hasta la zona de Navia, por lo que casi toda la línea de costa de Asturias queda englobada en este grupo, con un alto porcentaje de algas rojas y dominado por las algas rojas calcáreas *Corallina officinalis* y *Ellisolandia elongata*. En segundo lugar, los 7 tramos más orientales (aproximadamente 140 km de costa desde la frontera con Francia) se han considerado una nueva tipología (E), ya que las distancias euclídeas mínimas entre los puntos centrales de estos tramos y las neuronas iniciales son mayores de 0.7. En la tipología E el valor medio de la SST máxima es 25.97 °C con una desviación estándar de ± 0.2 °C, por lo que podrán encontrarse en esta zona comunidades de macroalgas de aguas cálidas que en la actualidad no se localizan en la Cornisa Cantábrica sino en latitudes más bajas.

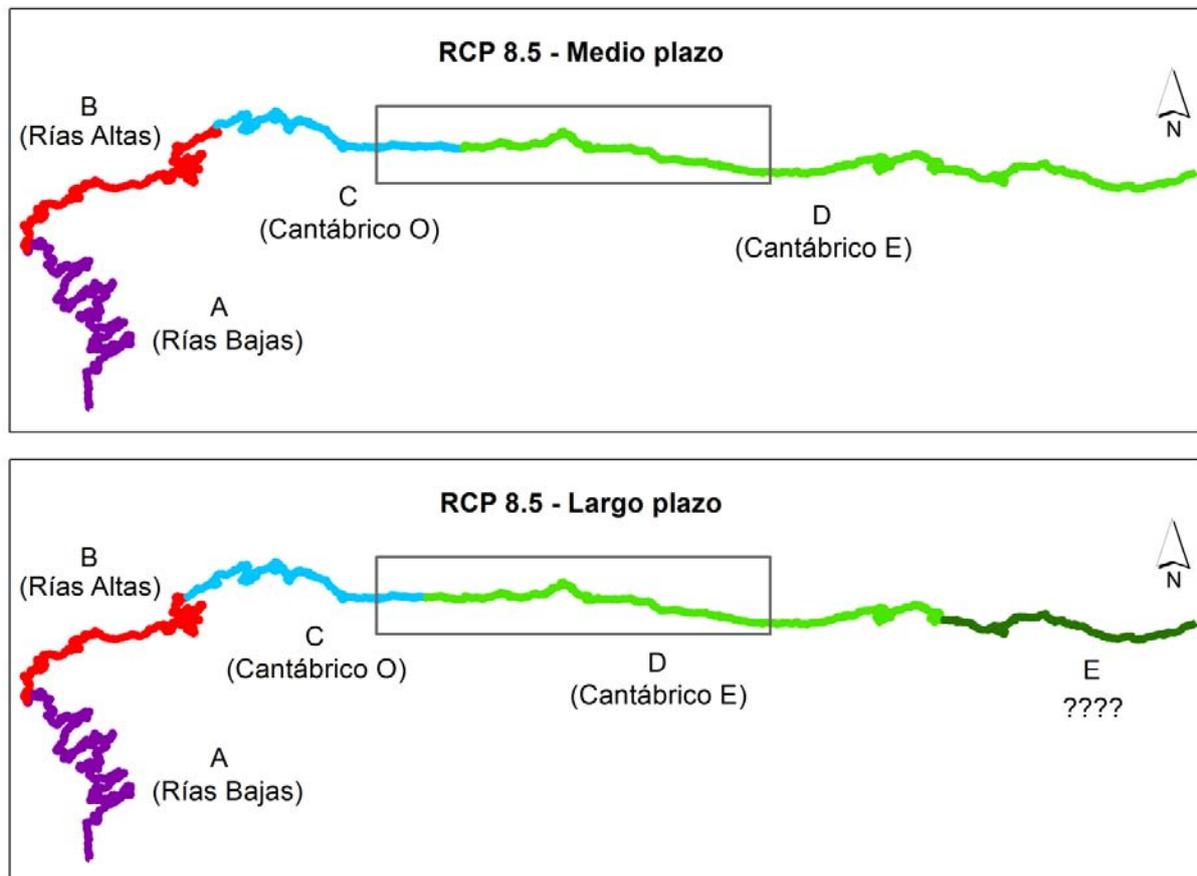


Figura 4.36. Tipologías obtenidas para el escenario de cambio climático RCP 8.5. Superior: medio plazo. Inferior: largo plazo.

4.4.2. Distribución potencial de *Gelidium corneum*

En este apartado se realiza una primera aproximación del efecto que el cambio en las variables físicas como consecuencia del calentamiento global va a tener sobre una especie de interés ecológico y económico en las costas asturianas. Dada la necesidad de abarcar todo el rango de variabilidad de la especie, para poder desarrollar un modelo suficientemente robusto, se ha considerado como zona de aplicación toda la costa europea.

De entre las especies disponibles se ha seleccionado el alga roja *Gelidium corneum* (ocle), dada su importancia en el litoral cantábrico en la estructuración y producción del ecosistema submareal, así como por constituir la mayor fuente de materia prima en su género para la extracción de agar-agar (McHugh, 1991). Esta condición de recurso explotable comercialmente ha provocado además un incentivo para su estudio, por lo que su conocimiento y su cartografiado son más completos que los de otras especies.

4.4.2.1. Exposición

Dado que no se dispone de una cartografía de *G. corneum* a nivel europeo, se ha optado por considerar exclusivamente datos de presencia, obtenidos de diversas fuentes registradas de enero de 1975 en adelante (véase la tabla 4.5). No obstante, estos datos fueron filtrados previamente con base en revisión bibliográfica y criterio de experto para eliminar los que se consideraron anómalos. Finalmente, tras la revisión bibliográfica se

descartaron algunos datos de las costas Noruegas, de acuerdo al trabajo de Brattegard & Holthe (1997).

Fuente	Referencia/link
NE Atlantic macroalgae Database	Ramos et al., 2014
Global Biodiversity Information Facility (GBIF)	http://www.gbif.org/
Ocean Biogeographic Information (OBIS)	http://www.iobis.org/es

Tabla 4.5. Fuentes de datos de presencia de *Gelidium corneum*.

A partir de las bases de datos detalladas anteriormente, se ha obtenido la distribución actual de *Gelidium corneum* en las costas europeas que se muestra en la Figura 4.37. Como se puede observar, los límites de distribución de la especie son consistentes con estudios previos que establecen su límite septentrional en el sur de Gran Bretaña, una mayor presencia en las costas españolas y portuguesas y localización ocasional y límite sur de su distribución en el Sáhara Occidental y Mauritania (Gorostiaga, 1990).

Asimismo, tal y como se observa en su mapa de distribución y de acuerdo con lo descrito previamente por otros autores (Borja, 1988), aparece con mayor probabilidad en costas batidas orientadas al Norte o Noroeste. Cabe resaltar, que dentro de estas zonas *G. corneum* se localiza preferentemente en acantilados verticales, desde el intermareal hasta el infralitoral, con preferencia por suelos de roca calcárea.



Figura 4.37. Puntos de presencia de *Gelidium corneum* considerados.

4.4.2.2. Impactos

4.4.2.2.1. Metodología

El nicho que realmente ocupa una especie es menor que su nicho fundamental, según la definición de Hutchinson (1957), dado que existen factores biológicos, geográficos y humanos que lo limitan (Pulliam 2000). Por lo tanto, cuando existe información que cubre adecuadamente el rango de distribución de la especie, es posible obtener una aproximación fiable de su nicho real (Phillips et al. 2004).

Dada la dificultad de conocer y modelar los factores biológicos y antrópicos que intervienen, se ha planteado la determinación de la aptitud del medio para el desarrollo óptimo de *G. corneum* de acuerdo con las condiciones físicas del mismo. Para ello se ha aplicado el modelo de distribución MaxEnt (Maxent versión 3.3.3k), que es un modelo del tipo "modelado con datos de presencia solamente" que permite estimar la relación entre los registros de las especies y un conjunto de variables ambientales (Elith et al. 2011). Su aplicación en diferentes investigaciones ecológicas se ha extendido en los últimos años para relacionar la distribución de la vegetación y la predicción de cambios ante variaciones medioambientales (Phillips et al., 2006; Verbruggen et al., 2009).

El modelo MaxEnt se basa en el principio estadístico de máxima entropía, estimando una distribución de probabilidades, sujeta a una serie de restricciones que reflejan la información incompleta de que se dispone sobre la distribución real de la especie (Phillips et al., 2006; Steven & Dudík, 2008). En concreto calcula la probabilidad de una distribución de máxima entropía igual a una distribución de Gibbs que maximice el producto de las probabilidades de los puntos de muestreo considerados como punto de partida. El resultado de la aplicación de MaxEnt es la modelización de la distribución potencial de la especie dentro del territorio de estudio.

En este caso, la información relativa a la distribución de la especie se limita a los datos de presencia obtenidos de las fuentes presentadas anteriormente, así como el conjunto de variables ambientales (features) relacionadas con la presencia actual de la especie. Las variables consideradas, la justificación de su inclusión y las fuentes de datos en cada caso se indican a continuación:

- Temperatura superficial del agua (SST): como se ha comentado ya en el apartado de proyecciones, la temperatura superficial del agua se considera que es uno de los principales factores que controlan el crecimiento de los productores primarios, como las fanerógamas marinas (Lee et al., 2007) o las macroalgas (Lüning, 1990) y de algunos consumidores (Salman et al., 2001; Panigada et al., 2008).

Para la SST se han considerado los valores medios, máximos y mínimos, de manera que se abarquen tanto las condiciones medias como extremas en las que vive *G. corneum*.

- Radiación fotosintéticamente activa (PAR): el rango de radiación solar que los organismos fotosintéticos son capaces de utilizar resulta decisivo en su fisiología y producción de biomasa (Best et al. 2001, Riis et al. 2012). Sin embargo, por encima de ciertos niveles, en función de la especie, la radiación puede generar efectos negativos sobre los organismos fotosintéticos (fotoinhibición), por lo que es

necesario considerar tanto los valores medios como los extremos (Häder & Figueroa, 1997; Quintano et al., 2013).

Por ello, se han tenido en cuenta tanto el valor medio del PAR como el máximo para considerar el mencionado efecto de la fotoinhibición.

- Altura de ola significativa (H_s): entre los factores que determinan la distribución de algas y fanerógamas en zonas expuestas (intermareal) o sumergidas (submareal) destaca su capacidad para resistir el arranque (Borja et al., 2013; Chust et al., 2013; Infantes et al., 2011; Ondiviela et al., 2014). Es por ello, que, como en los casos anteriores, es necesario conocer los umbrales en los que cada especie se instala (Fonseca & Bell 1998). Además, la altura de ola significativa constituye también un indicador de la tasa de sedimentación.

Dada la resistencia de *G. corneum* al oleaje, su hábitat se ha caracterizado por el percentil 99 de la altura de ola significativa (Díez et al., 2012).

- Batimetría: la batimetría proporciona información de las posibles zonas de asentamiento de las especies, en relación al límite de penetración de la luz en el agua.

Variables	Fuente	Resolución espacial	Resolución temporal	Período
Temperatura superficial del agua (SST)	OSTIA dataset (Operational Sea surface Temperature and sea-Ice concentration Analysis)	0.05°	Diario	1985-2013
Radiación fotosintéticamente activa (PAR)	Satellite sensor (SeaWiifs and Modis Aqua, NASA)	2 Km	Mensual	1999-2004
Altura de ola significativa (H_s)	Regional hindcast (GOW, IH Cantabria)	0.25°	Horario	1995-2013
Batimetría (ETOPO1)	National Geophysical Data Center, NOAA	0.017°	-	-

Tabla 4.6. Fuentes de datos de las variables físicas, resolución espacial, temporal y período de las mismas.

Para la caracterización de la costa europea se ha dividido ésta en 109 polígonos, subdivididos a su vez en 9946 teselas con una resolución espacial aproximada de 20 Km. En el punto central de cada una de las teselas se ha obtenido la información referente a las variables físicas seleccionadas. En este estudio solo se introdujeron variables continuas al modelo, para las que se han considerado las clases lineales y cuadráticas, es decir, que la media de las muestras indica las condiciones medias de presencia de la especie y que su variación define la tolerancia a la misma de la especie (Elith et al., 2011). De esta manera los resultados resultan más fáciles de interpretar y el modelo aditivo resultante presenta mejores capacidades de generalización (Guzmán Álvarez et al., 2012).

Para cuantificar la importancia de cada variable en el desarrollo de *Gelidium corneum* se ejecutó el procedimiento Jackknife, que consiste en excluir una variable y ejecutar el modelo con el resto de las variables ambientales. Como complemento se han obtenido igualmente las curvas de respuestas de las variables ambientales originales, que muestran la variación que experimenta la probabilidad de presencia de la especie al

modificar cada una de las variables ambientales. Estas curvas constituyen una aproximación a la determinación de los umbrales de la especie, teniendo en cuenta que cada curva de respuesta representa solo una fracción de la probabilidad de presencia final de la especie, dependiendo de la importancia que tenga la variable ambiental sobre su distribución.

De acuerdo con trabajos previos, se utilizaron el 20% de las muestras para el testado de los resultados y el 80% para el entrenamiento (Richards & Friess, 2015).

Se ejecutó un análisis de sensibilidad del multiplicador de regularización, ya que su ajuste permite evitar sobreajustes del modelo. Para ello se ejecutaron 10 réplicas con la única variación del valor del multiplicador (1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15). La bondad del modelo se evaluó con el indicador AUC (área bajo la curva ROC), tratando de maximizar su valor puesto que indica la probabilidad de que el algoritmo de clasificación ordene correctamente dos eventos, uno positivo y otro negativo; así como de minimizar la diferencia entre los valores AUC de testado y entrenamiento (Warren & Seifert, 2010). Como se observa en la Figura 4.38, el aumento de los valores del factor de regularización aumenta la dispersión de la distribución, provocando un menor ajuste. Por lo tanto, se ha seleccionado un multiplicador de regularización de valor 1 que minimiza la diferencia entre los valores AUC de entrenamiento y de testado (0.11) y los mantiene AUC > 0.85, es decir, el 85% del tiempo una selección aleatoria del grupo de positivos tendrá una puntuación mayor que una selección aleatoria del grupo negativo (DeLeo, 1993).

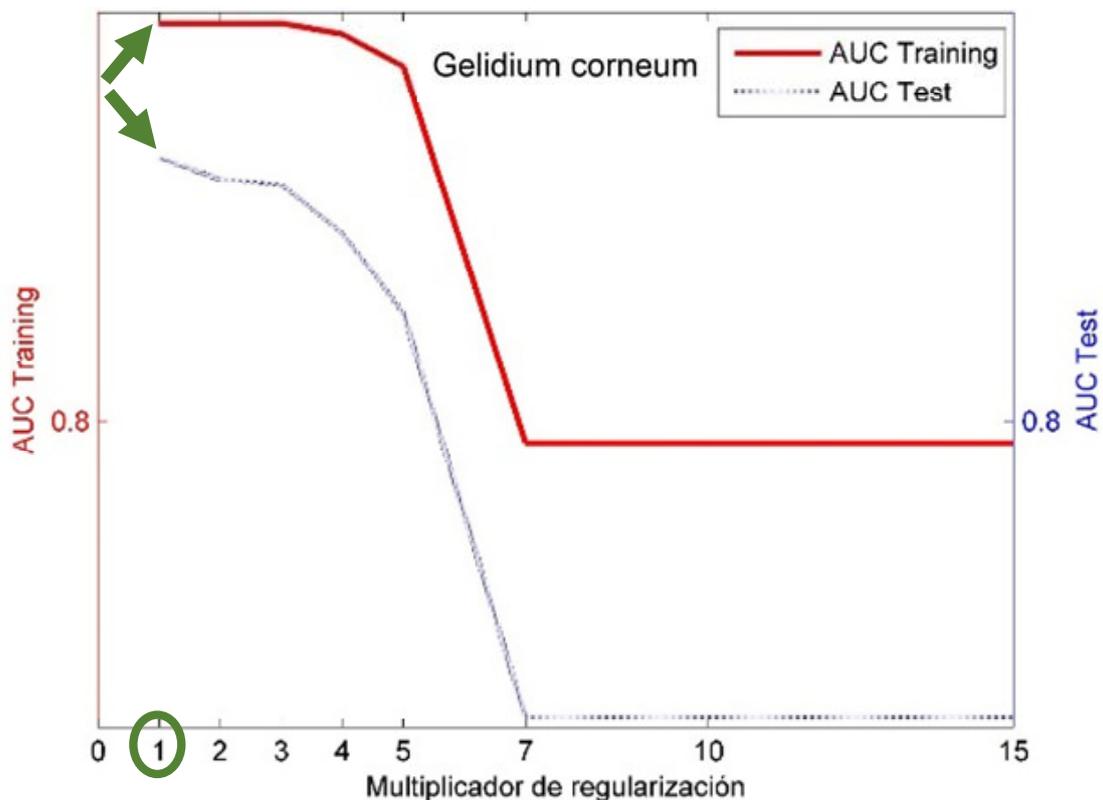


Figura 38. Análisis de sensibilidad del multiplicador de regularización.

4.4.2.2.2. Resultados

A continuación se muestra la distribución espacial de las diferentes variables consideradas para la elaboración del modelo. En este caso, dado que se pretende analizar la distribución potencial de la especie en diferentes escenarios futuros, es necesario caracterizar tanto la situación actual como las proyecciones previsibles de las variables consideradas.

De la misma manera que para el N y NO de la Península Ibérica, se ha considerado la temperatura como el factor más determinante en la inducción de los cambios a escala europea. Por ello, se han proyectado para el medio y largo plazo, para los dos escenarios considerados, los indicadores de temperatura superficial del agua siguiendo la metodología anteriormente expuesta (comparación clásica). Esto nos permite utilizar los resultados del MaxEnt como modelo predictivo de la distribución futura de la especie objeto de estudio.

□ Presente

- Temperatura superficial del agua (SST)

La distribución de las temperaturas a partir de los datos de reanálisis presenta un claro gradiente N-S con los valores más bajos en la Península de Kola y el Golfo de Botnia; mientras que el Mar Mediterráneo, especialmente en su cuenca este, los valores son hasta 25°C superiores para la temperatura máxima que en el norte de Europa.

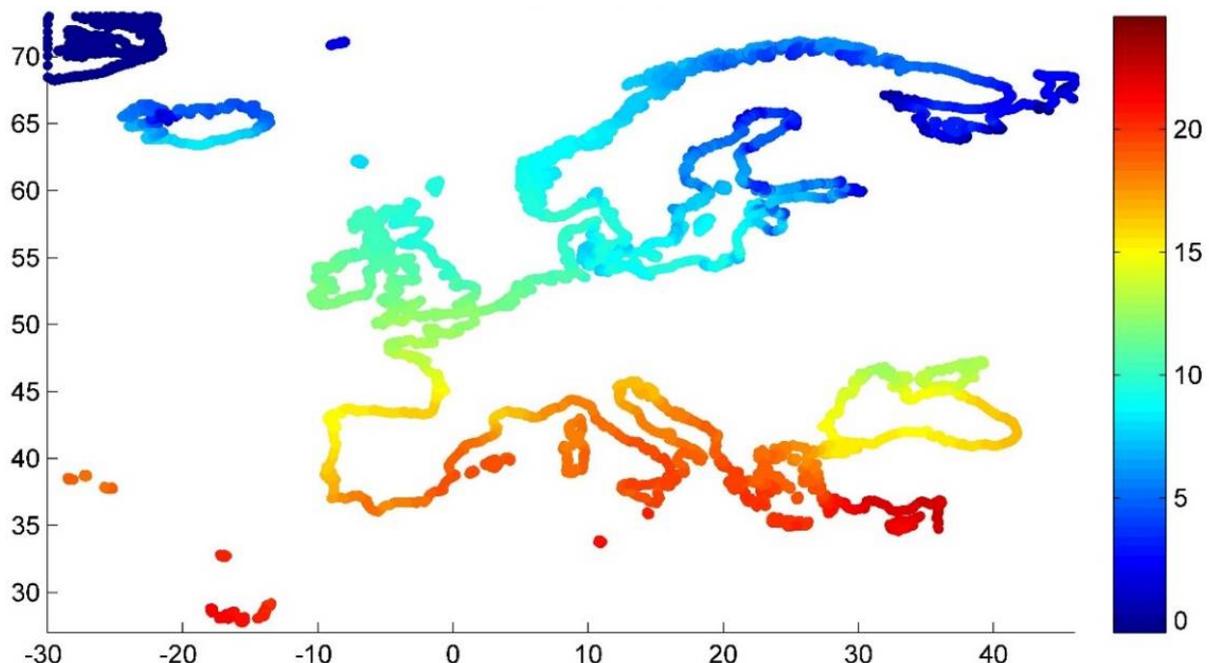


Figura 4.39. Distribución actual de la SST media.

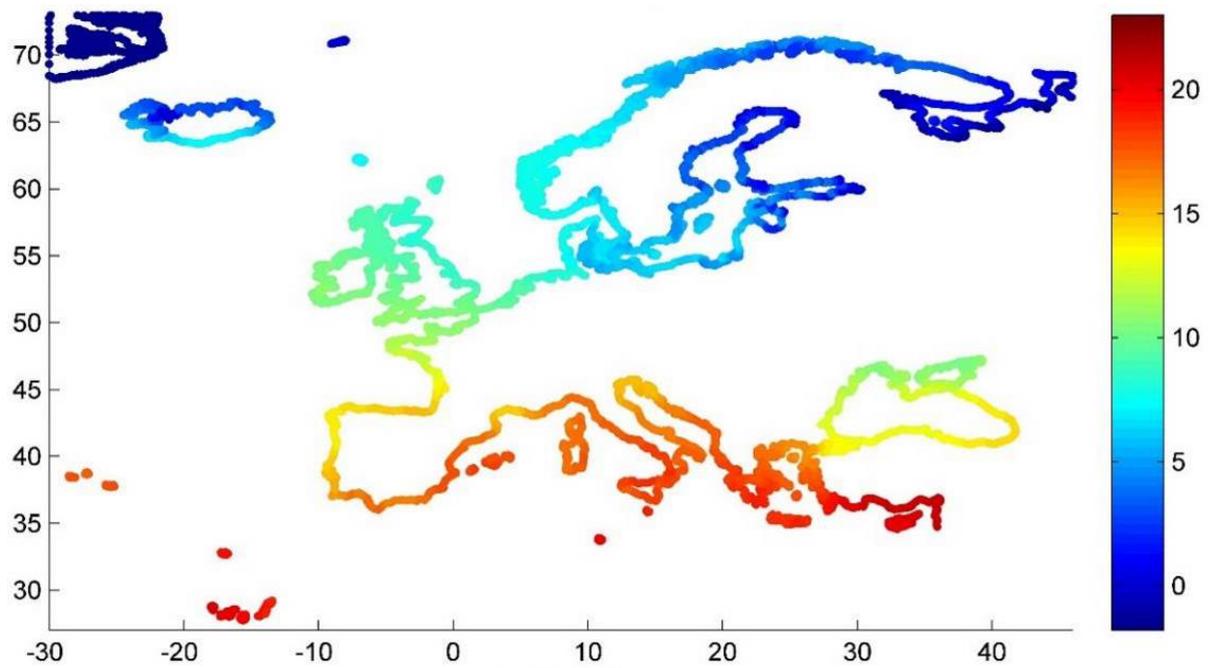


Figura 40. Distribución actual de la SST mínima.

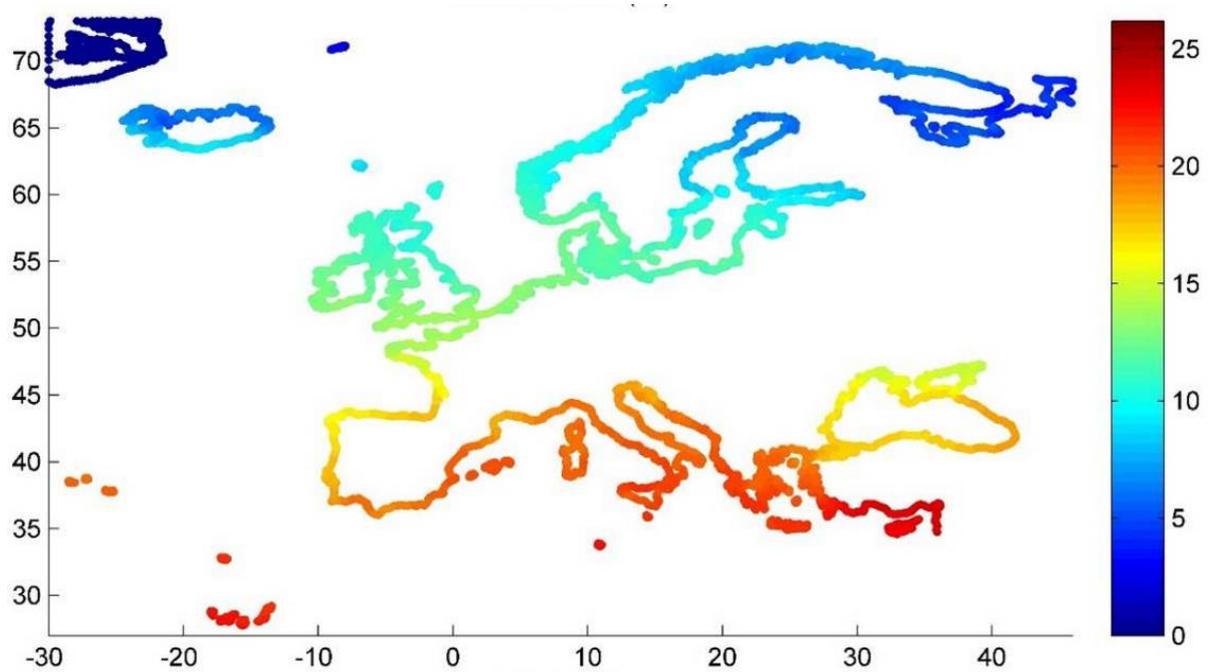


Figura 4.41. Distribución actual de la SST máxima

- Radiación fotosintéticamente activa (PAR)

Tanto el PAR medio como los valores máximos presentan valores mayores hacia el sur de Europa, destacando para el caso de los valores medios la zona norte y noreste del Mar Báltico con valores superiores a su entorno.

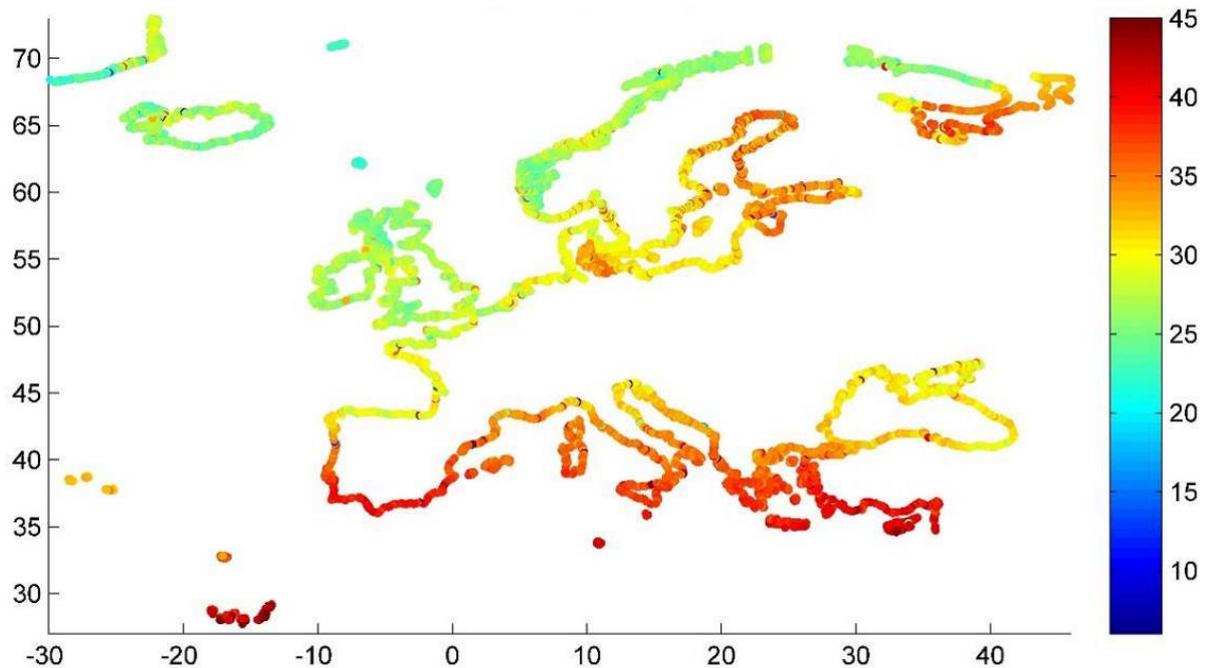


Figura 4.42. Distribución actual del PAR medio (mol/m²/día).

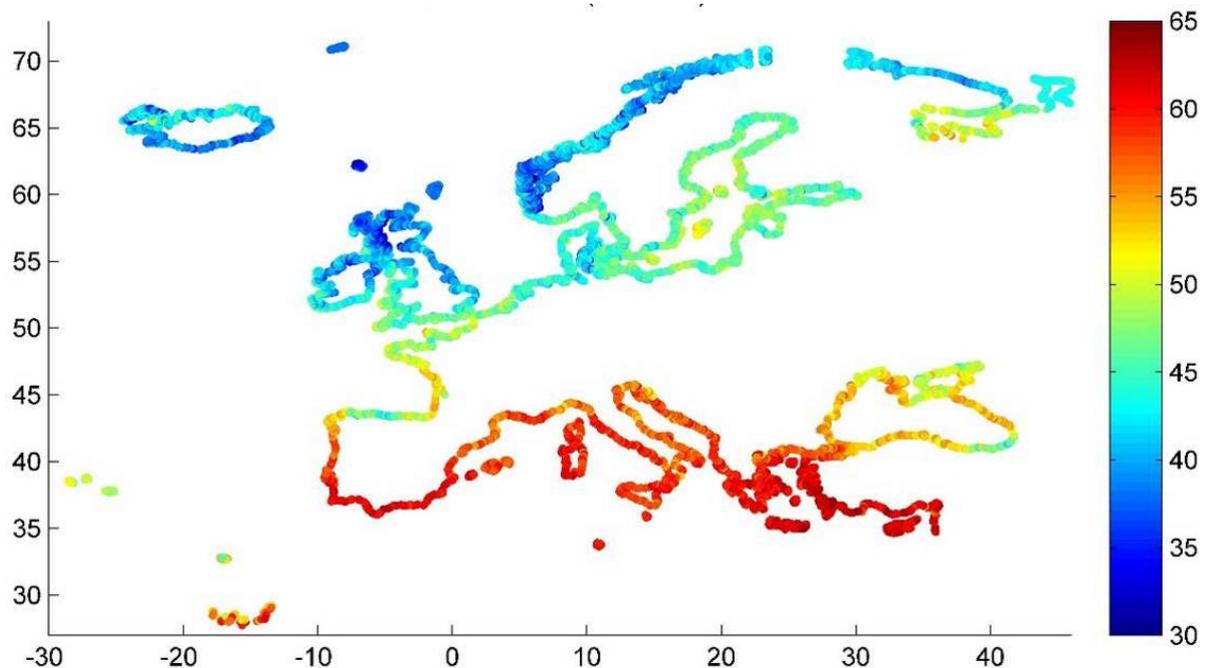


Figura 4.43. Distribución actual del PAR máximo (mol/m²/día).

- Altura de ola significativa (Hs)

La distribución del percentil 99 de la altura de ola significativa presenta mayores valores en las costas más expuestas y, como resulta esperable, valores más bajos en los mares más cerrados como el Adriático en el Mediterráneo o el Golfo de Botnia en el Mar Báltico. En las costas europeas más occidentales, como el oeste de Irlanda o el noroeste de España, se observan valores superiores a 6 m.

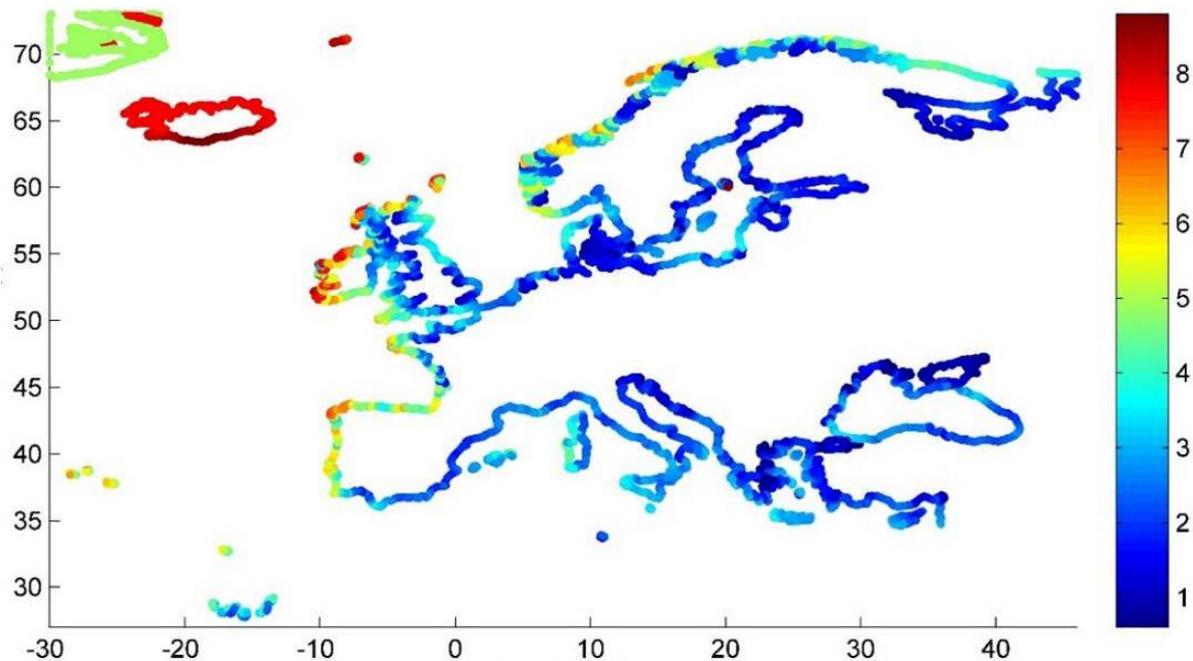


Figura 4.44. Distribución actual del percentil 99 de la altura de ola significativa.

- Batimetría

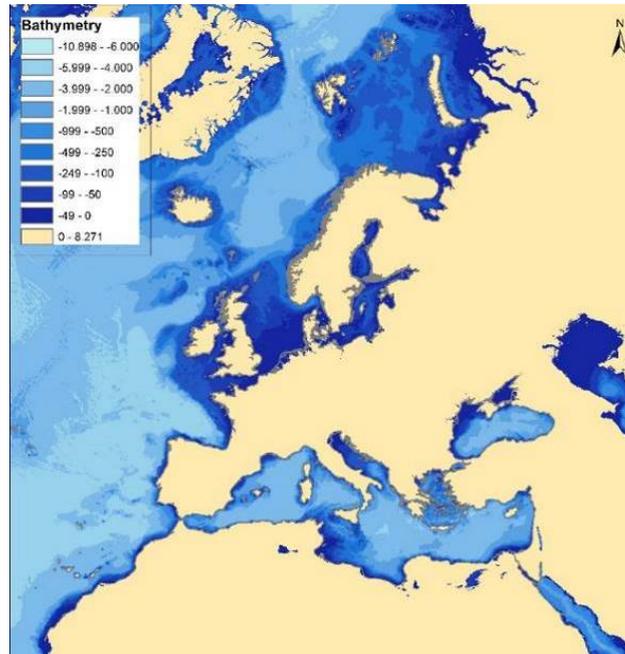


Figura 45. Batimetría de Europa.

□ Proyecciones

Para los periodos de tiempo proyectados se conserva el gradiente N-S observado con los datos de reanálisis; sin embargo, existen diferencias para los distintos indicadores en lo que los valores de los incrementos se refiere, como se detalla a continuación.

SST media

Los aumentos de temperatura superficial media alcanzan valores cercanos a 5°C para la ruta representativa de concentración más pesimista (RCP 8.5) y de 3°C para la RCP 4.5. En ambos casos, como ya se ha comentado, los mayores cambios se producen en el largo plazo y provocan que para el RCP 8.5 en el periodo 2070-2099 la costa mediterránea alcance valores por encima de 25°C de media.

- RCP 4.5

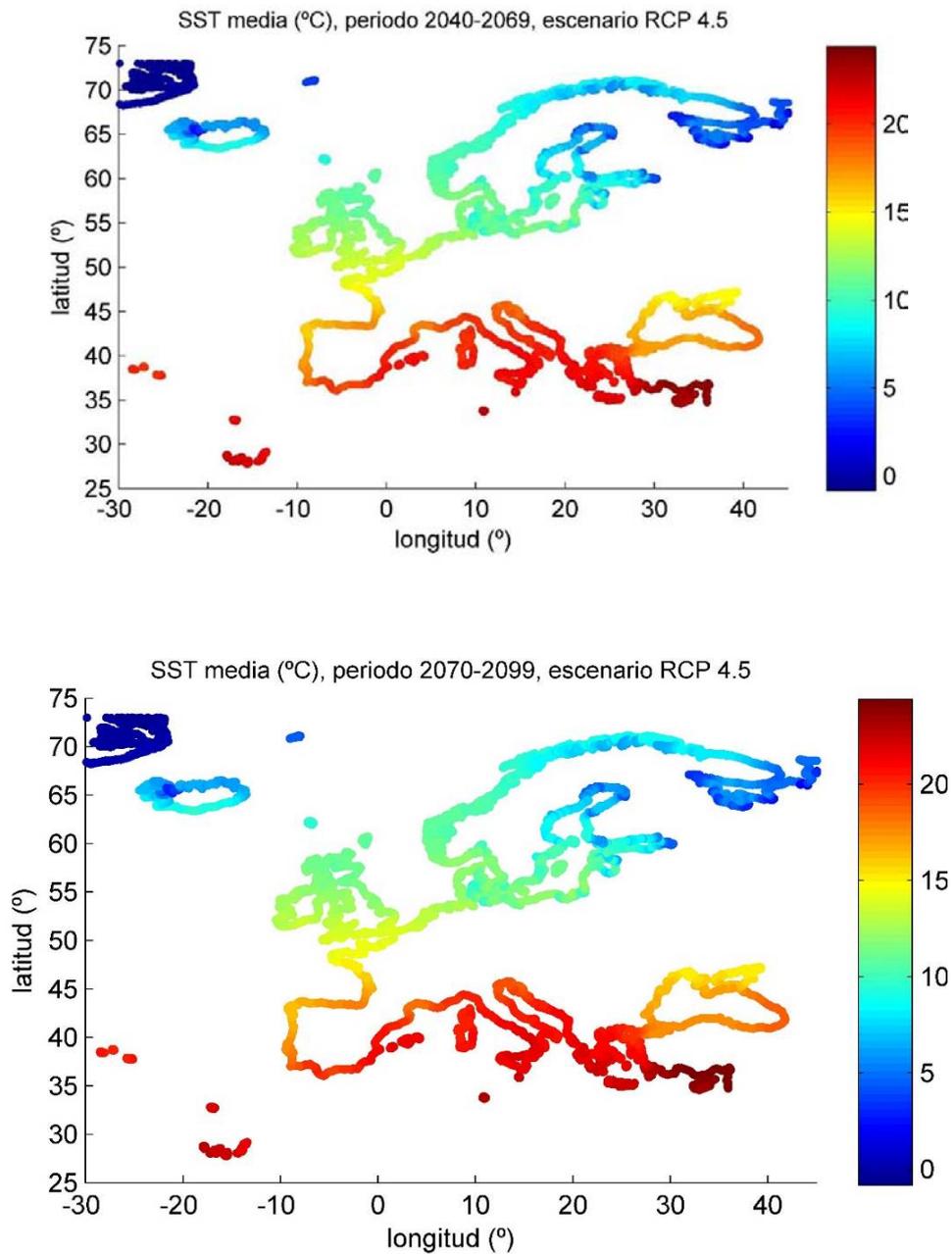


Figura 4.46. SST media proyectada (°C) para el escenario RCP 4.5. Panel superior: medio plazo (2040-2069). Panel inferior: largo plazo (2070-2099).

- RCP 8.5

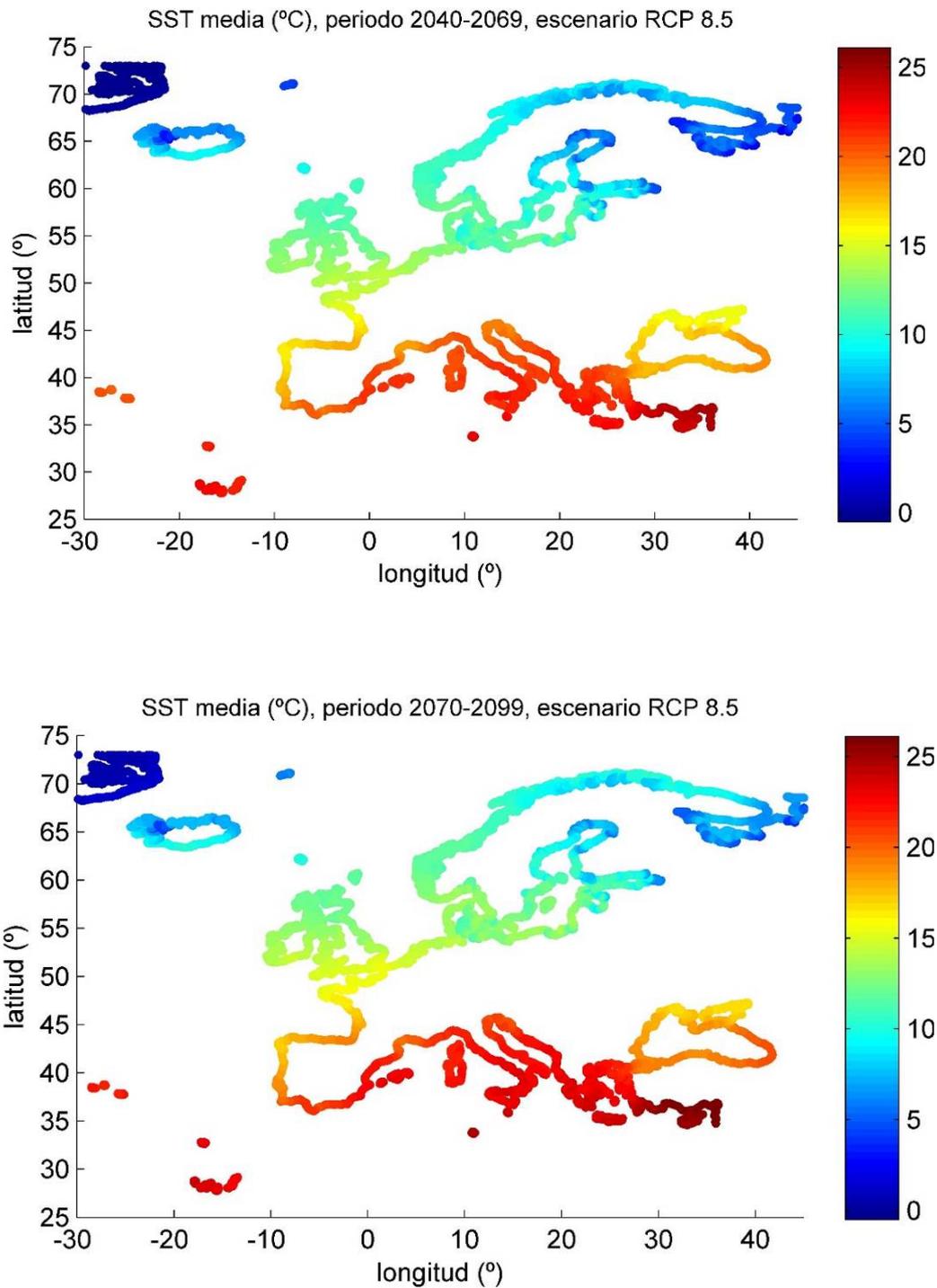


Figura 4.47. SST media proyectada (°C) para el escenario RCP 8.5. Panel superior: medio plazo (2040-2069). Panel inferior: largo plazo (2070-2099).

SST mínima

En lo que a la temperatura mínima se refiere, los incrementos anteriormente referidos generan valores máximos por encima de 20°C para los dos escenarios y los periodos considerados.

- RCP 4.5

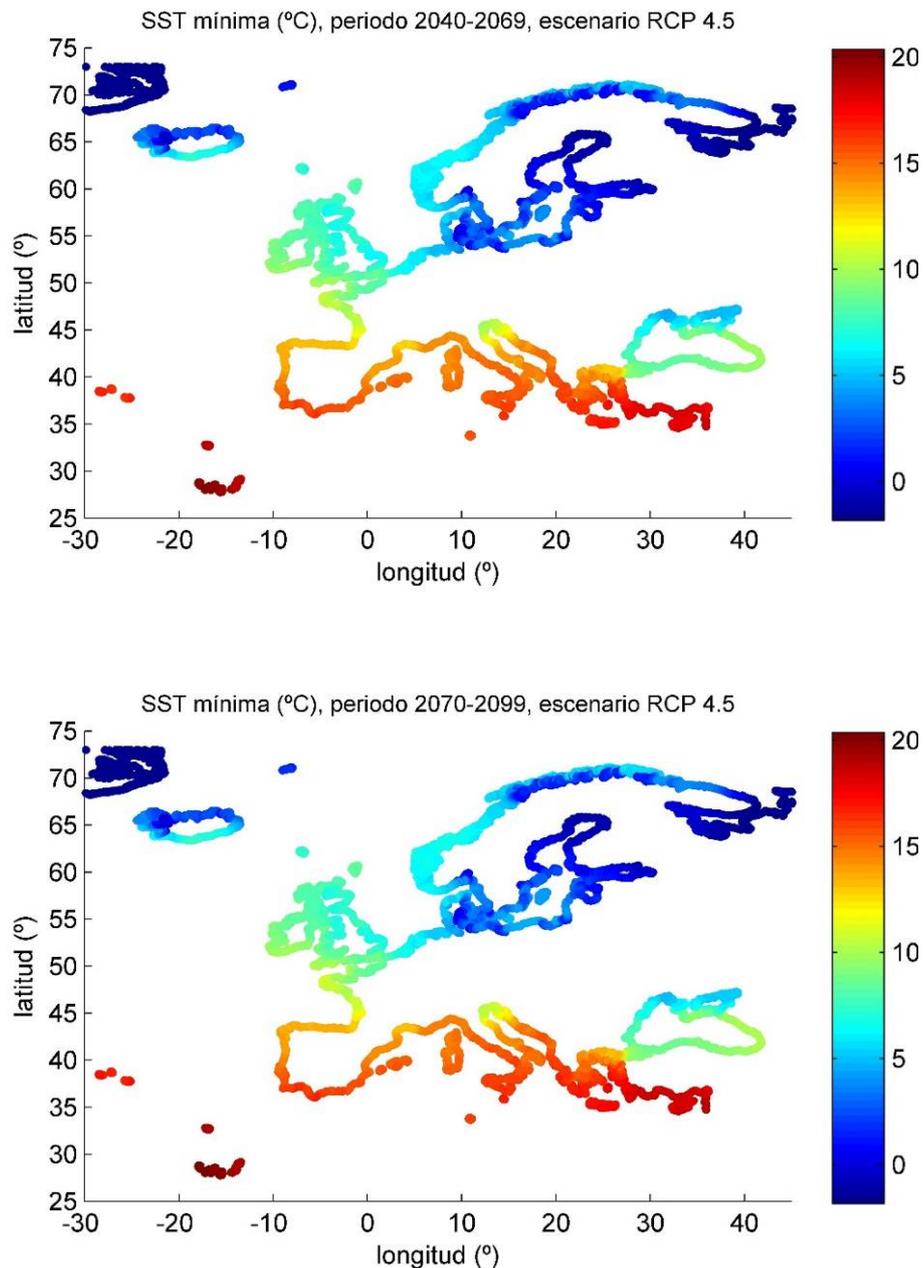


Figura 4.48. SST mínima proyectada (°C) para el escenario RCP 4.5. Panel superior: medio plazo (2040-2069). Panel inferior: largo plazo (2070-2099).

- RCP 8.5

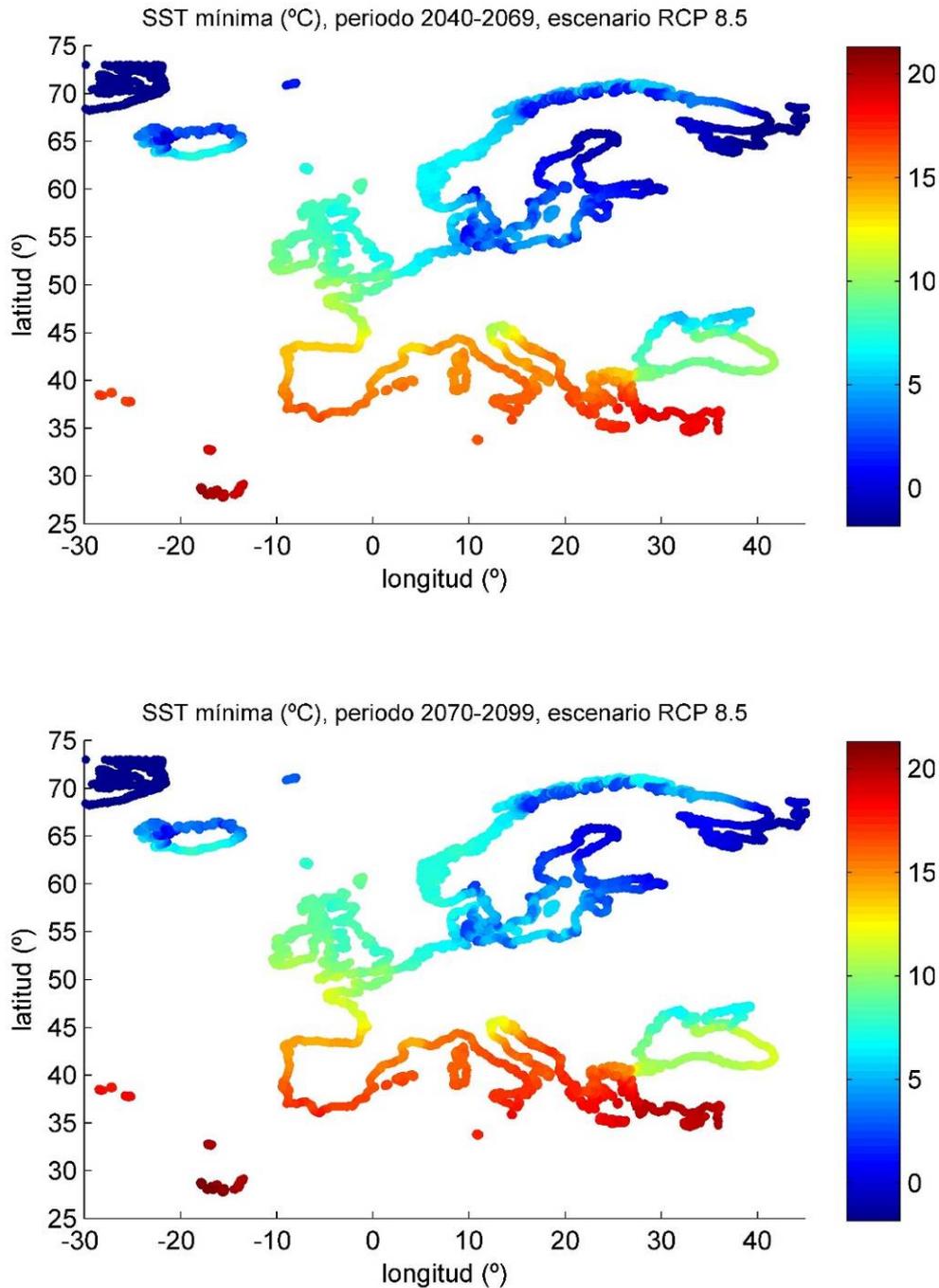


Figura 4.49. SST mínima proyectada (°C) para el escenario RCP 8.5. Panel superior: medio plazo (2040-2069). Panel inferior: largo plazo (2070-2099).

SST máxima

La temperatura superficial máxima alcanza valores superiores a los indicadores anteriores, llegando para el largo plazo de la RCP 8.5 a valores por encima de 33°C y en cualquier caso, para los dos RCP y los dos periodos temporales, con máximos superiores a 30°C.

- RCP 4.5

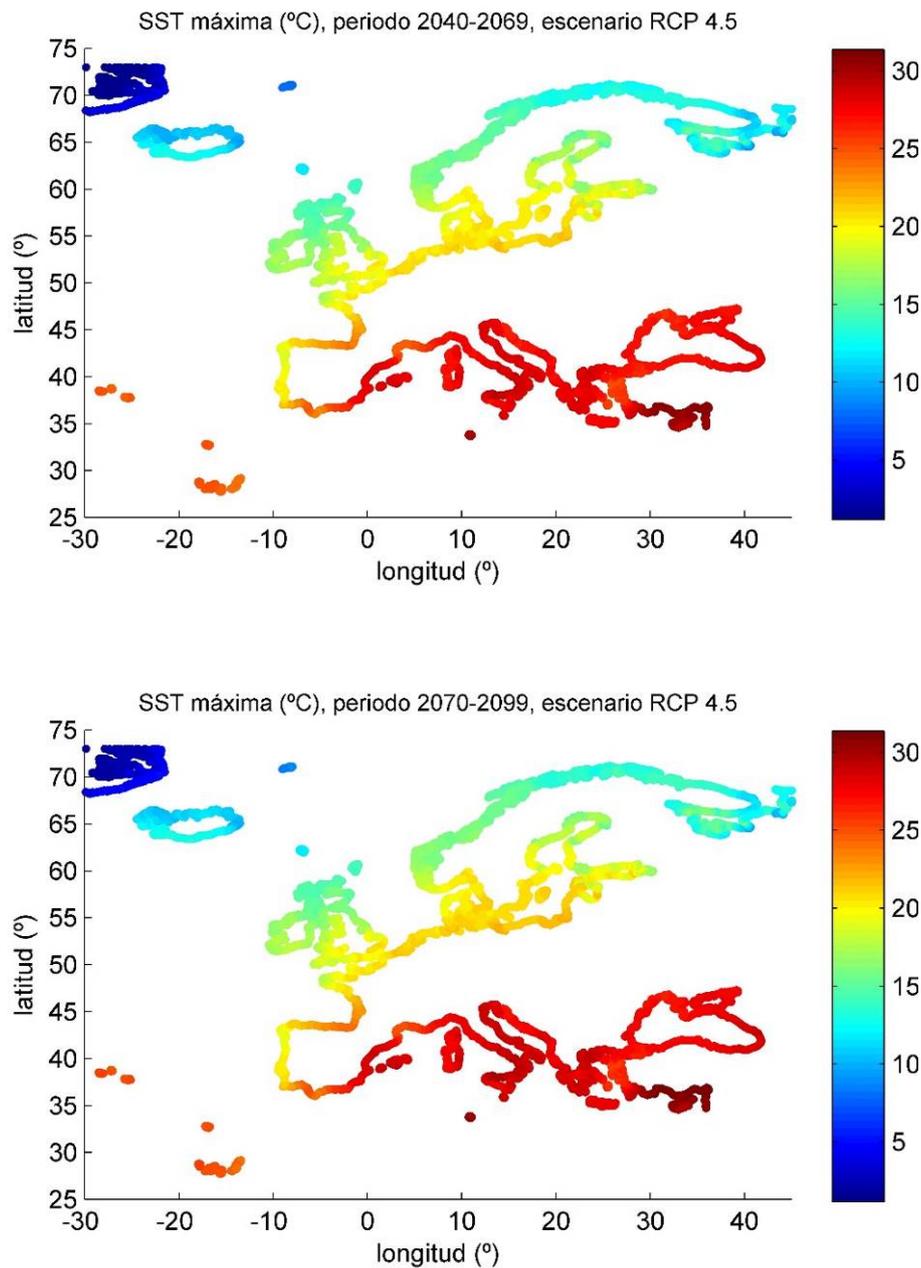


Figura 50. SST máxima proyectada (°C) para el escenario RCP 4.5. Panel superior: medio plazo (2040-2069). Panel inferior: largo plazo (2070-2099).

- RCP 8.5

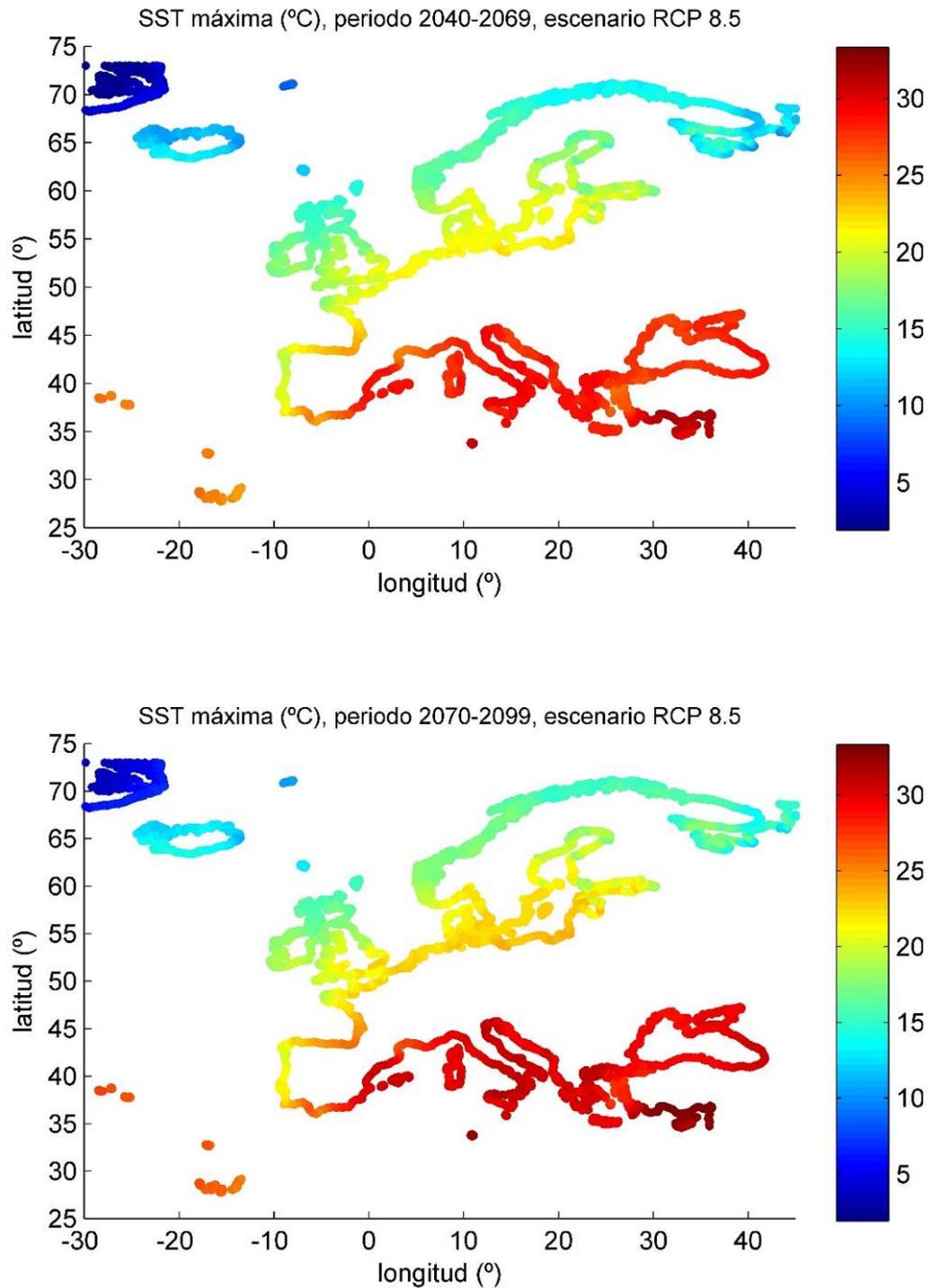


Figura 4.51. SST máxima proyectada (°C) para el escenario RCP 8.5. Panel superior: medio plazo (2040-2069). Panel inferior: largo plazo (2070-2099).

Con el objetivo de determinar la importancia de cada variable, se ejecutaron diferentes pruebas de sensibilidad de acuerdo con la distribución actual de *Gelidium corneum*. Para el modelo final se seleccionaron únicamente aquellas variables cuya contribución fuese superior al 5% (Coro et al. 2015). Así las variables finalmente consideradas fueron la SST mínima y el percentil 99 de la altura de ola significativa.

Una vez ejecutado el modelo MaxEnt se obtuvo la probabilidad de presencia de la especie en el territorio analizado para cada una de las RCP y los plazos temporales considerados. No obstante, en la zona central y sur del Mediterráneo la temperatura superficial mínima para los escenarios y plazos proyectados se encuentra fuera del rango de la temperatura mínima presente, por lo que los resultados obtenidos en esta zona han de ser considerados con precaución (Elith et al., 2010).

Las mayores diferencias debidas al cambio climático son esperables en los límites norte y sur de los límites de distribución de la especie (Díez, 2012). En este caso se produce un ascenso hacia el norte Europa de la probabilidad de presencia de la especie, con valores superiores a 0.6 en las costas irlandesas, llegando incluso a las costas noruegas e islandesas (Figura 4.49. y 4.53). No obstante, analizando los resultados a nivel europeo, se observa que los cambios en los diferentes escenarios, para el medio y largo plazo, son poco notables.

En la zona de la Cornisa Cantábrica, se obtiene una probabilidad de presencia de *G. corneum* superior a 0.4 en toda la costa, para el escenario más cercano y optimista (RCP 4.5 medio plazo) (Figura 4.49 la figura 4.52), con los valores más bajos en la costa este de Asturias y alguna localización concreta en el sur de Galicia. Las mayores probabilidades se registran en el norte y oeste de Galicia, probablemente ligado a las temperaturas más frías asociadas a los fenómenos de upwelling frecuentes en la zona. Estos patrones generales se mantienen constantes en la escala del norte de España para los diferentes periodos y escenarios considerados.

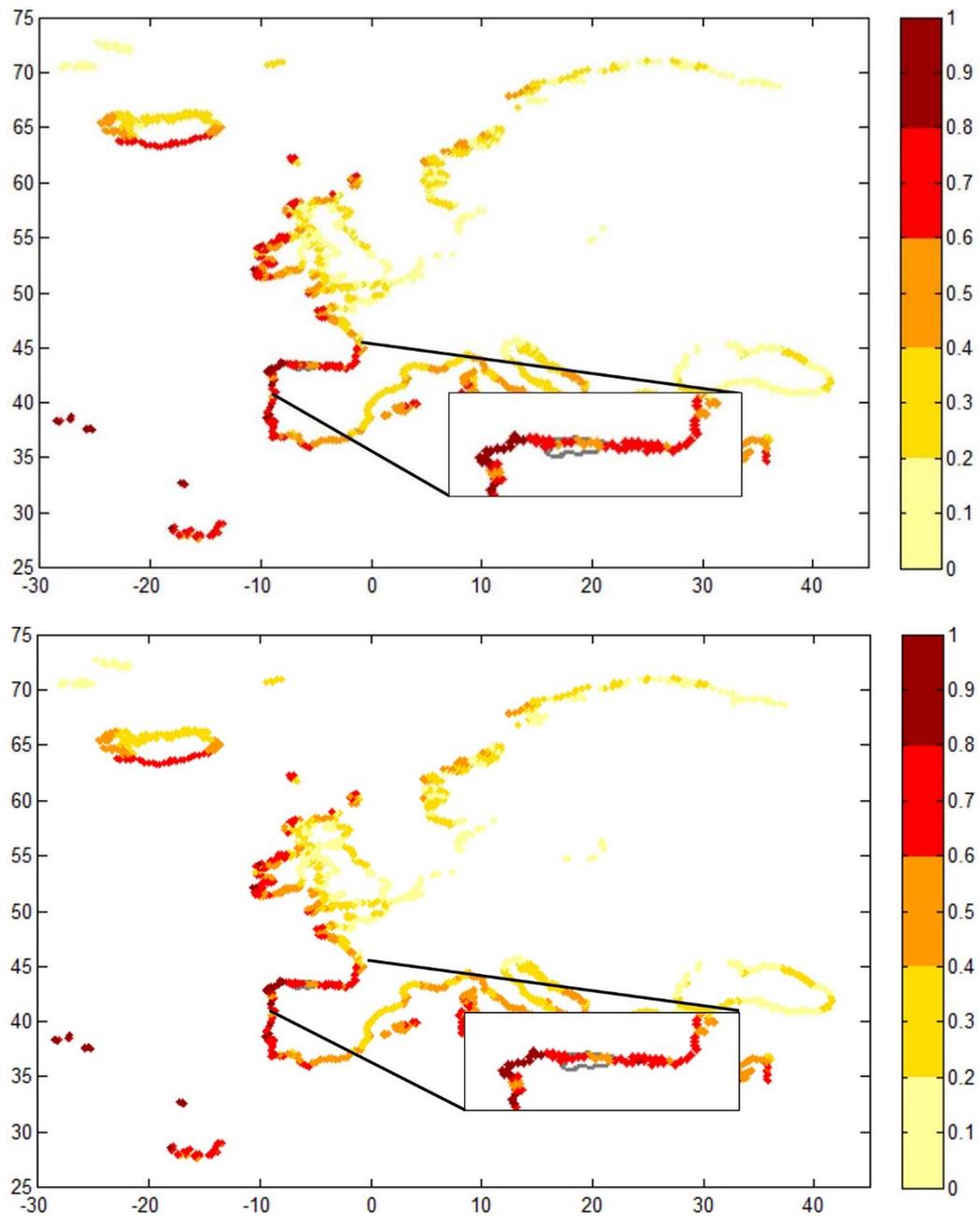


Figura 4.52. Probabilidad de presencia de *Gelidium corneum* para el escenario RCP 4.5. Panel superior: medio plazo (2040-2069). Panel inferior: largo plazo (2070-2099).

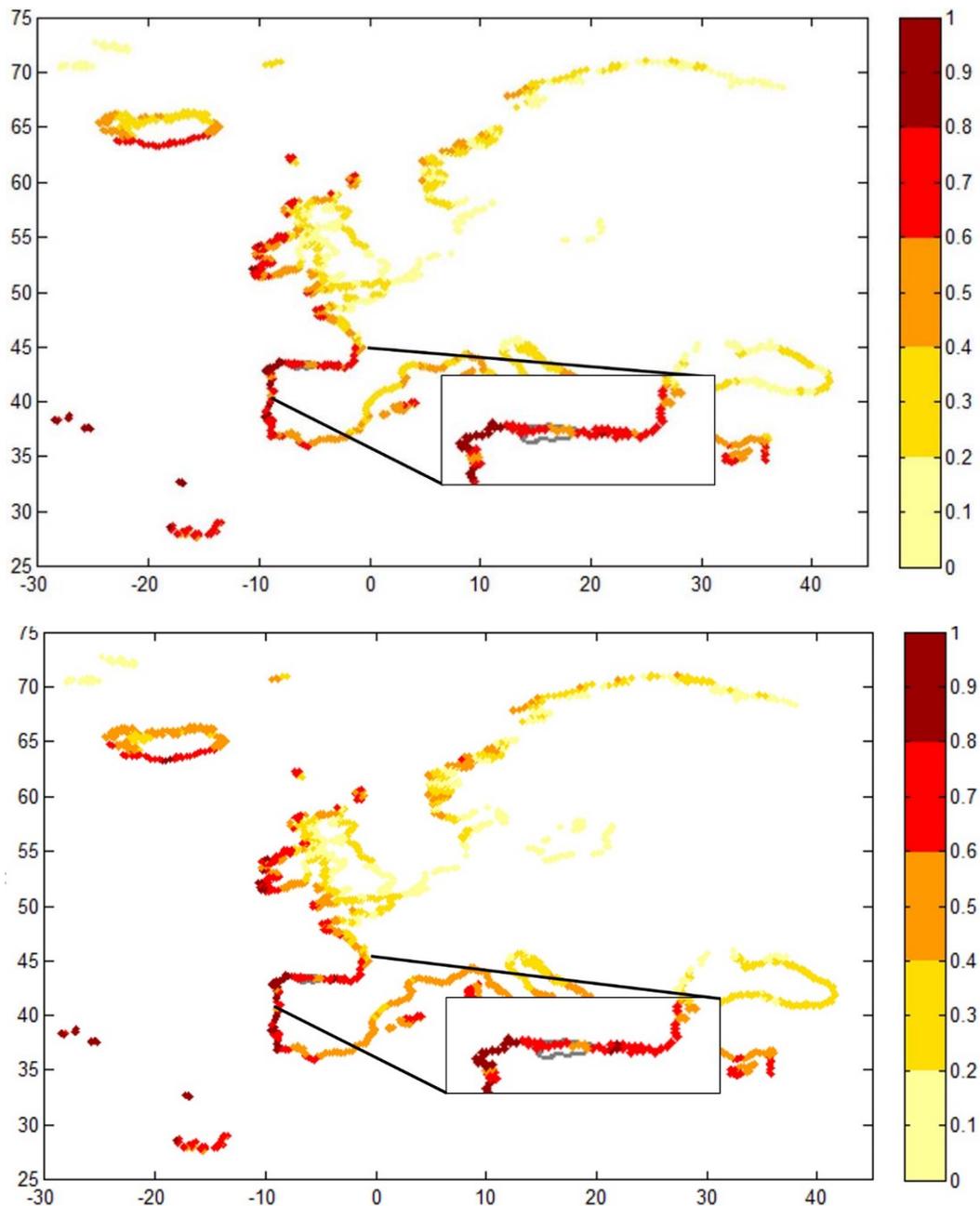


Figura 4.53. Probabilidad de presencia de *Gelidium corneum* para el escenario RCP 8.5. Panel superior: medio plazo (2040-2069). Panel inferior: largo plazo (2070-2099).

El modelo genera también un análisis de la importancia de cada variable, expresada a través de un índice de ganancia, de manera que las variables más influyentes alcanzan índices de ganancias más elevados (véase la figura 4.54). Se muestra una única figura puesto que los índices de ganancia para los diferentes escenarios son iguales al considerar las mismas variables y ajustes. En este caso destaca la contribución fundamental de la temperatura superficial mínima, con un porcentaje cercano al 60% frente al 41% del percentil 99 de la altura de ola significativa.



Figura 4.54. Índice de ganancia de cada variable durante el entrenamiento.

Se obtuvieron igualmente las curvas de respuestas de las variables ambientales originales, que muestran la variación que experimenta la probabilidad de presencia de la especie al modificar cada una de las variables ambientales (véase la figura 4.55). Hay que tener en cuenta que la probabilidad que se obtiene de cada curva de respuesta representa solo una fracción de la probabilidad de presencia final de la especie, dependiendo de la importancia que tenga la variable ambiental sobre la distribución de la especie. Los resultados son consistentes con la ecología de *Gelidium corneum* ya comentada, con mayores presencia en zonas típicamente atlánticas, de temperaturas mínimas entre 14°C y 18°C y alturas de ola extremas superiores a 6 m.

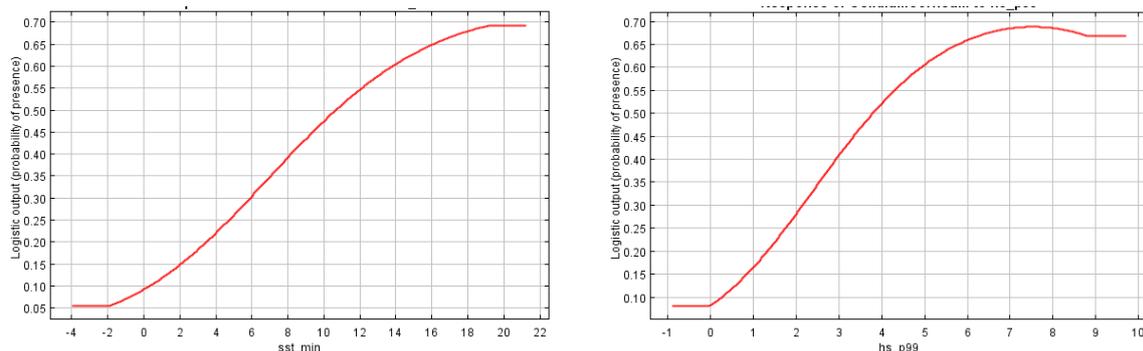


Figura 4.55. Curvas de respuesta de la temperatura mínima (izquierda) y el percentil 99 de la altura de ola significativa (derecha).

En lo que a la bondad del modelo conseguido se refiere (véase la figura 4.56), los valores del área bajo la curva (AUC) son superiores a 0.7 (AUC=0.874 para el entrenamiento y AUC=0.850 para el testado) por lo que se puede considerar adecuado, dado que el 85% del tiempo una selección aleatoria del grupo de positivos tendrá una puntuación mayor que una selección aleatoria del grupo de negativos (Fielding & Bell 1997). En otras palabras, hay un 85% de probabilidades aproximadamente de que el algoritmo de clasificación ordene correctamente dos eventos, uno positivo y otro negativo.

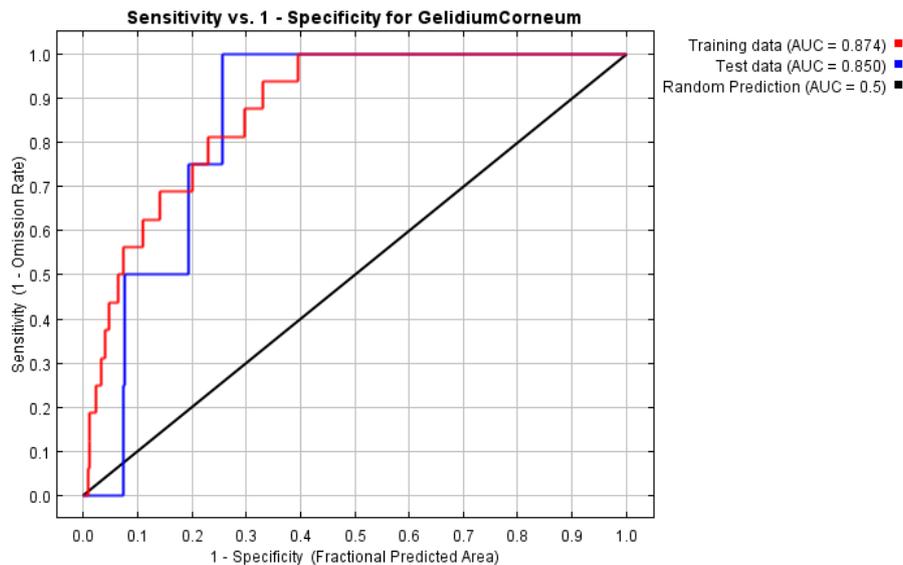


Figura 4.56. Área bajo la curva ROC (AUC) de los datos de entrenamiento (rojo), testado (azul) y la predicción aleatoria (negro).

4.5. Limitaciones

Los resultados del presente informe constituyen una primera aproximación a la determinación del riesgo sobre los ecosistemas debido al aumento del nivel del mar y de la temperatura superficial del mismo bajo escenarios de cambio climático, dado que los datos y el modelado de los mismos presenta las siguientes limitaciones:

- Información biológica

La información biológica disponible determina la capacidad para construir modelos de hábitat potencial que permitan cuantificar las relaciones entre el medio biótico y abiótico (e.g. aumento de la frecuencia de inundación, migración térmica de las especies) y, con base en ello, predecir la distribución de las especies. Por lo tanto, una mejora de las cartografías bionómicas conlleva una mejora de los modelos biológicos en los que se sustenta la metodología propuesta. Asimismo, dichos modelos se pueden completar con información procedente de estudios (e.g. experimentación biológica) en los que se cuantifica la influencia de diferentes factores ambientales (e.g. cambio la frecuencia del tiempo de emersión) sobre las dinámicas poblacionales de las especies. Con este tipo de información se pueden construir modelos biológicos con gran capacidad predictiva.

En el caso de *Gelidium corneum* es necesario tener en cuenta que, a pesar de los filtros aplicados, los datos de presencia utilizados en el modelo Maxent constituyen información incompleta sobre la distribución real de la especie.

- VARIABLES FÍSICAS

La falta de datos abióticos homogéneos en el área de estudio limita la capacidad de la metodología para establecer el riesgo sobre los ecosistemas debido a la subida del nivel del mar o el aumento de la temperatura.

Así, la caracterización de la inundación a través de una única variable, cota máxima de inundación, resulta insuficiente para predecir su efecto sobre los hábitats y especies costeros no sujetos a dicha dinámica. La incorporación de variables adicionales, obtenidas a partir de modelos numéricos, permitiría caracterizar con mayor detalle el proceso de la inundación. Desde un punto de vista ecológico, la frecuencia y duración de la inundación son variables que están estrechamente relacionadas con la distribución de las especies ya que condicionan el tipo de hábitat costero, tanto terrestre como intermareal. En el caso de zonas submareales la altura de la columna de agua es un descriptor clave del tipo de hábitat bentónico (e.g. EUNIS) ya que determina, en gran medida, la supervivencia y distribución de las especies (e.g. la penetración de la luz determina la distribución de los productores primarios bentónicos). Por lo tanto, es necesaria su caracterización a través de modelado numérico e integrar dicha información en la metodología para predecir su distribución bajo diferentes escenarios de cambio climático.

En cuanto a *Gelidium corneum*, sobre su distribución actúan más variables físicas de las consideradas en el modelado (tipo de sustrato, nutrientes, etc.), cuya falta de datos homogéneos en todo el área de estudio ha imposibilitado su inclusión. De entre las variables introducidas en el modelo Maxent solo la temperatura superficial del agua se ha proyectado bajo escenarios de cambio climático, considerando las demás variables estables. No obstante, existen evidencias de que otras variables también se modificarán como consecuencia del calentamiento global, pero no se dispone actualmente de información precisa sobre la magnitud de estos cambios. Además de las variables físicas, el establecimiento de las especies depende también de interacciones biológicas cuya complejidad no se ha tenido en cuenta en la determinación de probabilidades de ocurrencia.

Del mismo modo, el análisis de sensibilidad de las regiones biogeográficas se centra en la temperatura superficial máxima del agua, sin considerar la modificación del resto de variables físicas en un escenario futuro de cambio climático.

- ESCALA

Es necesario considerar que para una evaluación más precisa del riesgo sobre los ecosistemas de la costa de Asturias se hace imprescindible disponer de información física y biológica a una escala de mayor detalle.

- MODELOS DE PREDICCIÓN

Los resultados y conclusiones obtenidas en este capítulo están sujetos a la incertidumbre asociada a los modelos de predicción de aumento del nivel medio del mar y la temperatura superficial del mar a lo largo de la costa asturiana.

5. CONCLUSIONES

La Tarea 2.5 tiene como objetivo dar una estimación de la dimensión del cambio climático en el Principado de Asturias mediante la determinación del riesgo sobre los sistemas socioeconómico y natural.

5.1. Metodología

El análisis del riesgo planteado en este trabajo está enmarcado dentro de una metodología más general de riesgo adoptada por el IPCC en la que el concepto de riesgo se basa en la combinación de la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad, configurando lo que se conoce como el triángulo del riesgo.

5.2. Riesgo sobre el sistema socioeconómico

A lo largo de este Capítulo se han estimado las consecuencias esperables debidas a los impactos de inundación y erosión sobre el sistema socioeconómico.

Los puntos clave de la metodología de análisis del riesgo de inundación son los siguientes:

- Se han definido escenarios de riesgo que combinan cambios en el clima (concretamente en el nivel medio del mar) y cambios en las variables socioeconómicas tales como la población, la renta per cápita, el stock de capital y el Valor Añadido Bruto (VAB). En el caso de la población, a mitad de siglo se han asumido las proyecciones del gobierno del Principado de Asturias y a final de siglo, dada la tendencia tan acusada de decrecimiento de la población que presentan las proyecciones, se ha decidido asumir la hipótesis razonable de mantener la población actual. En el caso de la renta per cápita, el stock de capital y el VAB, se ha realizado la media de los últimos 5, 10, 15, 20, 25, 30,... años y se ha tomado como tasa de cambio la media del crecimiento menor, dato a partir del cual se ha extrapolado a 2050 y a 2100 para cada caso.
- Tanto la renta per cápita como sus proyecciones no se han empleado como indicadores de la economía de la región sino como instrumentos de reparto, de modo que sea posible medir el impacto económico redistributivo asociado al stock de capital de vivienda, del que se sólo se disponen datos agregados a todo el Principado de Asturias. Esto promueve un reparto del stock de vivienda más equitativo pues los concejos cuya población tenga mayor poder adquisitivo dispondrán de mejores y más costosas residencias.
- El cálculo de las consecuencias en el stock de capital requiere, en los casos de inundación por evento extremo, de la implementación de curvas de daño para obtener el daño efectivo en función de la cota de inundación alcanzada. Para el escenario de inundación permanente, sin embargo, se asume que el daño es siempre máximo pues los terrenos inundados quedan anegados y se pierden definitivamente.
- En el cálculo de las consecuencias sobre el VAB si la inundación es permanente se debe asumir que, en las zonas inundadas, las pérdidas de producción son totales. Sin embargo, cuando se analizan los posibles daños causados por inundaciones asociadas a eventos extremos, la producción se pierde durante un tiempo tras el

cual se vuelve a recuperar. En este estudio se ha establecido una relación entre la cota de inundación alcanzada en las distintas zonas afectadas y los días de pérdida de producción. No obstante, en el caso del VAB agrícola dependerá del momento en el que se produzca tal evento, es decir, si la inundación tiene lugar antes de la cosecha, se perderá todo, y si tiene lugar tras la misma, no habrá prácticamente daños. Como este dato no puede conocerse se ha asumido la situación más pesimista, que es la de considerar, en cualquier caso, la pérdida total de la producción.

- Para poder tratar de manera homogénea las consecuencias derivadas de los escenarios planteados a medio y a largo plazo y hacerlos así comparables entre ellos y con el contexto socioeconómico actual, es necesaria la aplicación de una tasa de descuento de manera que no sólo estén expresados en unidades monetarias constantes del presente sino que, además, se haya tenido en cuenta el impacto diferenciado entre distintos años horizonte.
- La gestión del riesgo asociado al cambio climático requiere de una estrategia sostenida, según cada sector o sistema, a distintos horizontes temporales. En este estudio se propone como objetivo mantener el nivel de riesgo actual. A mitad de siglo los efectos del aumento del nivel medio del mar incrementarán el nivel de riesgo, respecto al riesgo actual, de bajo a moderado en El Franco, Coaña, Cudillero, Gijón y Llanes, de moderado a moderado-alto en Tapia de Casariego, Castropol, Navia, Valdés, Soto del Barco, Castrillón y Ribadesella, y de moderado-alto a alto en Muros de Nalón. A finales de siglo sólo los concejos de Pravia y Caravia mantendrán un nivel de riesgo bajo, alcanzando Navia, Muros de Nalón y Soto del Barco niveles de riesgo muy preocupantes. En este último caso, los desbordamientos de las rías de Navia y Nalón conllevarán graves consecuencias sobre la población, los activos y la producción de estos concejos.

Los distintos indicadores de la economía de la región empleados en la valoración de las consecuencias derivadas de los escenarios propuestos provienen de distintas fuentes, periodos de tiempo y escalas espaciales, con distintos niveles de incertidumbre asociados.

De la metodología de análisis del riesgo de erosión destacan los siguientes aspectos clave:

- El análisis de riesgo se ha llevado a cabo en 57 playas del Principado de Asturias con longitud igual o mayor a 200 metros y tipología de sedimento arena.
- Dada la gran variabilidad asociada al proceso de evaluación del valor recreativo de las playas se ha considerado razonable asumir la hipótesis de mantener constante la estructura salarial de la sociedad, las preferencias de los usuarios y los servicios complementarios que ofrecen a día de hoy las playas objeto de este estudio. Los escenarios de riesgo propuestos, por tanto, únicamente contemplan cambios en el clima.
- Asumiendo que el uso recreativo es una de las principales funciones de una playa y que su pérdida afectaría de forma directa a la afluencia de turismo en la región, se ha determinado el valor de uso recreativo por metro de playa de cada una de las playas de estudio. No obstante, son muchas las hipótesis asumidas y también

los parámetros complementarios que intervienen. Para un análisis detallado sería necesario hacer un trabajo de campo que permitiese calibrar todas las partes del proceso, lo cual excede el alcance de este estudio.

- El análisis de la erosión se ha llevado a cabo mediante la aplicación de la 'Regla de Bruun', que establece que el ascenso del nivel medio del mar provoca el retroceso del perfil de playa. El modelo asume numerosas hipótesis simplificadoras como suponer todas las playas encajadas, el tamaño del grano homogéneo en cada una de ellas, la altura de berma constante y la conservación del sedimento en el sistema.

Las consecuencias obtenidas no pretenden constituir un pronóstico de daños sino más bien un ejercicio de ensayo en el que se presenta lo que podría observarse en un territorio teórico que resultaría de una evolución del espacio socioeconómico de estudio ante escenarios climáticos para así poder mostrar cómo podrían contribuir las estrategias de adaptación con las que cuenta la sociedad y evaluar su posible aportación al bienestar social.

5.3. Riesgo sobre el sistema natural

A partir de los resultados del análisis de riesgos realizado en la costa de Asturias se concluir lo siguiente:

- La magnitud de los impactos sobre los hábitats y especies costeras muestra una relación directamente proporcional con el aumento del nivel medio del mar y la temperatura superficial del agua, de tal forma que los escenarios de cambio climático más pesimistas se corresponden con un impacto mayor.
- Las masas de agua de transición y, concretamente, el estuario de Navia son los espacios naturales protegidos más impactados. En estas zonas se ven afectados por el aumento del nivel medio del mar una mayor proporción relativa de hábitats.
- La ZEC Penarronda-Barayo se caracteriza por un elevado número de hábitats afectados por la inundación. Dicho ZEC alberga la masa de agua de transición del estuario de Navia y, por lo tanto, muestra valores relativamente altos de impacto sobre algunos de sus hábitats. Además, se observan amplias superficies de hábitats inundados no sólo en el estuario de Navia sino también en la Playa de Frexulfe y Reserva de Barayo.
- Los hábitats naturales más impactados son los bosques, tanto de coníferas como de ribera, y los pastizales, mesófilos y salinos atlánticos. Ambos tipos de hábitats se caracterizan por ocupar amplias extensiones dentro de la zona de estudio. Por otro lado, también las construcciones y hábitats artificiales experimentan un fuerte impacto del aumento del nivel medio del mar bajo escenarios pesimistas.
- Las regiones biogeográficas definidas en la costa N y NO de la Península Ibérica muestra una mayor sensibilidad al aumento en la temperatura superficial máxima del agua en la zona central de Asturias y en el norte de las Rías Altas.

- En el escenario más pesimista (RCP 8.5) y para el periodo 2070-2099 (largo plazo) el análisis de sensibilidad a la temperatura muestra una modificación de la tipología ecológica de casi toda la costa asturiana, pasando de ser una zona de transición entre el interior del golfo de Vizcaya y las Rías Altas, a un grupo caracterizado por las mayores temperaturas máximas, generando un ambiente óptimo para el desarrollo de especies de macroalgas de latitudes bajas.
- De acuerdo con el modelo MaxEnt, los cambios en la distribución de *Gelidium corneum* para los escenarios y periodos considerados no serán significativos.
- Los resultados y conclusiones obtenidas en este capítulo están sujetas a la incertidumbre asociada a los modelos de predicción de aumento del nivel medio del mar a lo largo de la costa Asturiana y a la cartografía bionómica disponible.

6. REFERENCIAS

- Amante, C. and B.W. Eakins, 2009. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA. doi:10.7289/V5C8276M [12 febrero 2015].
- Alcok, R. 2003. The effects of climate change on rocky shore communities in the Bay of Biscay, 1895-2050. Ph.D. Thesis, University of Southampton, U.K.
- Bates, P.D., Horritt, M.S., Fewtrell, T.J., 2010. A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *Journal of Hydrology* 387(1–2): 33–45.
- Batista e Silva, F., Gallego, J., Lavalle, C., 2013. A high resolution population grid map for Europe. *Journal of Maps* 9:1, 16-28.
- Best, E. P. H., Buzzelli, C. P., Bartell, S. M., Wetzel, R. L., Boyd, W. a., Doyle, R. D., & Campbell, K. R., 2001. Modeling submersed macrophyte growth in relation to underwater light climate: Modeling approaches and application potential. *Hydrobiologia*, 444, 43–70. doi:10.1023/A:1017564632427
- Borja, A., Fontán, A., & Muxika; Iñigo, 2013. Interactions between climatic variables and human pressures upon a macroalgae population: implications for management. *Ocean & Coastal Management*, 76, 85–95.
- Bruun, P., 1954. Coast erosion and the development of beach profiles. Technical Memorandum, vol. 44. Beach Erosion Board, Corps of Engineers, 82 pp.
- Bruun, P., 1962. Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of the Waterways and Harbors Division* 88, 117 – 130.
- Bruun, P., 1983. Review of conditions for use of the Bruun Rule of erosion. *Coastal Engineering* 7, 77 – 89.
- Chust, G., Albaina, A., Aranburu, A., Borja, Á., Diekmann, O. E., Estonba, A., Valle, M., 2013. Connectivity, neutral theories and the assessment of species vulnerability to global change in temperate estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 131, 52–63. doi:10.1016/j.ecss.2013.08.005.
- Coro G, Magliozzi C, Ellenbroek A, Pagano P, 2015. Improving data quality to build a robust distribution model for *Architeuthis dux*. *Ecol Modell* 305:29–39.
- Dawson, R.F.F. y Overall, P.P., 1972. The Value of Motorists' Time. Report LR 426, Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory.
- Díez, I., Muguerza, N., Santolaria, a., Ganzedo, U., & Gorostiaga, J. M., 2012. Seaweed assemblage changes in the eastern Cantabrian Sea and their potential relationship to climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 99, 108–120. doi:10.1016/j.ecss.2011.12.027.

- Dodgson, J. y González, M., 1996. Un marco de análisis coste-beneficio para el transporte ferroviario. La regulación de los transportes en España. ISBN 84-470-0646-8, pp. 389-424.
- EEA, 2010. The European Environment. State of the Outlook 2010. Marine and coastal environment, European Environment Agency, Copenhagen.
- Elith, J., Kearney, M., & Phillips, S., 2010. The art of modelling range-shifting species. *Methods in Ecology and Evolution*, 1(2), 330–342. doi:10.1111/j.2041-210X.2010.00036.x
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J., 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17, 43–57. doi:10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x
- ETC/ACC, 2010a. European coastal climate change impacts, vulnerability and adaptation; a review of evidence. ETC/ACC Technical paper 2010/7, November 2010. European Topic Centre on Air and Climate Change.
- ETC/ACC, 2010b. Methods for assessing current and future coastal vulnerability to climate change. ETC/ACC Technical paper 2010/8, November 2010. European Topic Centre on Air and Climate Change.
- Fielding, A. H., & Bell, J. F., 1997. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence / absence models. *Environmental Conservation*, 24(1), 38–49.
- Fonseca, M., & Bell, S. S., 1998. Influence of physical settings on seagrass landscapes near Beaufort, North Carolina, USA. *Marine Ecology Progress Series*, 171, 109–121.
- Gouldby, B., Sayers, P., Mulet-Marti, J., Hassan, M. and Benwell, D., 2008. A methodology for regional-scale flood risk assessment. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Water Management* 161(3): 169–182.
- Gopi Goteti, 2014. R Package: Hazus. Damage functions from FEMA'S HAZUS software for use in modeling financial losses from natural disasters. Version 0.1.
- Häder, D., & Figueroa, F., 1997. Photoecophysiology of Marine Macroalgae. *Photochemistry and Photobiology*, 66(1), 1–14. doi:10.1111/j.1751-1097.1997.tb03132.x
- HMTO Green Book, 2011. Appraisal and Evaluation in Central Government. HM TREASURY.
- Hoegh-Guldberg, O., & J.F. Bruno, 2010. The impact of climate change on the world's marine ecosystems. *Science*, 328, 1523-1528.
- Hutchinson, G. E., 1957. Concluding remarks. In *Cold spring Harbor symposia on quantitative biology* (Vol. 22, pp. 415–427).
- Infantes, E., Orfila, A., Bouma, T. J., Simarro, G., & Terrados, J., 2011. *Posidonia oceanica* and *Cymodocea nodosa* seedling tolerance to wave exposure. *Limnology and Oceanography*, 56(6), 2223–2232. doi:10.4319/lo.2011.56.6.2223

- IPCC, 2013. Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- IPCC, 2014. 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. Chapter 5.
- Kohonen, T., 2000. Self-organizing Maps, 3rd ed. Springer-Verlag, Berlin.
- Lamela, C., Lamela-Silvarrey, C., Fernández, C., Anadón R., Arrontes, J., 2012. Fucooid assemblages on the north coast of Spain: past and present (1977-2007). *Bot. Mar.*, 55(3), 199-207.
- Lüning, K., 1990. Seaweeds. Their Environment, Biogeography, and Ecophysiology. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.
- McConnell, K. y Strand, I., 1981. Measuring the Cost of Time in Recreation Demand Analysis: An Application to Sportfishing. *American Journal of Agriculture Economics* 63, pp. 153-156.
- OCDE, 2014. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.
- Ondiviela, B., Losada, I. J., Lara, J. L., Maza, M., Galván, C., Bouma, T. J., & van Belzen, J., 2014. The role of seagrasses in coastal protection in a changing climate. *Coastal Engineering*, 87, 158–168. doi:10.1016/j.coastaleng.2013.11.005.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E., 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259. doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026.
- Phillips, S. J., Dudik, M., & Schapire, R. E., 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling. *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning*, 655–662. doi.acm.org/10.1145/1015330.1015412
- Pulliam, H. R. (2000). On the relationship between niche and distribution. *Ecology Letters*, 3(4), 349–361. doi:10.1046/j.1461-0248.2000.00143.x
- Quintano, E., Ganzedo, U., Díez, I., Figueroa, F. L., & Gorostiaga, J. M., 2013. Solar radiation (PAR and UVA) and water temperature in relation to biochemical performance of *Gelidium corneum* (Gelidiales, Rhodophyta) in subtidal bottoms off the Basque coast. *Journal of Sea Research*, 83, 47–55. doi:10.1016/j.seares.2013.05.008.
- Ramos, E., Puente, A., Juanes, J., 2015. An ecological classification of rocky shores at a regional scale: a predictive tool for management of conservation values. *Marine Ecology*, in press. doi: 10.1111/maec.12280.
- Recomendaciones para la evaluación económica, coste-beneficio, de estudios y proyectos de carreteras. MOPU. Octubre 1990.

- Riera, P., 1997. El valor del tiempo de desplazamiento recreativo al campo español. *Revista española de Economía Agraria* 179, pp. 191-201.
- Riis, T., Olesen, B., Clayton, J. S., Lambertini, C., Brix, H., & Sorrell, B. K., 2012. Growth and morphology in relation to temperature and light availability during the establishment of three invasive aquatic plant species. *Aquatic Botany*, 102, 56–64. doi: 10.1016/j.aquabot.2012.05.002
- Saltelli, A., Chan, K., Scott, E.M., 2004. *Sensitivity Analysis*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England.
- Schneiderbauer, S. y Ehrlich, D., 2004. *Risk, hazard and people's vulnerability to natural hazards. A review of definitions, concepts and data*. European Commission. Joint Research Centre, Luxemburgo. ISBN 92-894-8732-1.
- Steele, J.H. & Henderson, E.W., 1994. Modelling long term fluctuations in fish stocks. *Science* 224, 985 – 987.
- Van den Hoek, C., 1982a. The distribution of benthic marine algae in relation to the temperature regulation of their life histories. *Biological Journal of the Linnean Society*, 18, 81-144.
- Van den Hoek, C., 1982b. Phylogeographic distribution groups of benthic marine algae in the North Atlantic Ocean. A review of experimental evidence from life history studies. *Helgoländer Meeresunters*, 35, 153-214.
- Verbruggen, H., Tyberghein, L., Pauly, K., Vlaeminck, C., Nieuwenhuyze, K. Van, Kooistra, W. H. C. F., ... de Clerck, O., 2009. Macroecology meets macroevolution: Evolutionary niche dynamics in the seaweed *Halimeda*. *Global Ecology and Biogeography*, 18(4), 393–405. doi: 10.1111/j.1466-8238.2009.00463.x
- Voerman, S.E., Llera, E., Rico, J.M., 2013. Climate driven changes in subtidal kelp forest communities in NW Spain. *Marine Environmental Research*, 90, 119-127.
- Walker, B., Holling, C.S., Carpenter, S.R. and Kinzig, A., 2004. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society* 9(2), 5.
- Wernberg, T., Russell, B.D., Moore, P.J., Ling, S.D., Smale, D.A., Campbell, A., Coleman, M.A., Steinberg, P.D., Kendrick, G.A., Connell, S.D., 2011. Impacts of climate change in a global hotspot for temperate marine biodiversity and ocean warming. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 400, 7-16, doi: 10.1016/j.jembe.2011.02.021.



TAREA 2.6:

ATLAS Y VISOR DE RIESGOS



LISTA DE ACRONIMOS

DOW	DOWNSCALED OCEAN WAVES
GEIS	GASES DE EFECTO INVERNADERO
IGN	INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL
IPCC	INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE
GOS	GLOBAL OCEAN SURGE
LIDAR	SISTEMA LÁSER DE DETECCIÓN DE IMÁGENES (DEL INGLÉS LIGHT DETECTION AND RANGING O LASER IMAGING DETECTION AND RANGING)
MDT	MODELO DIGITAL DEL TERRENO
NMM	NIVEL MEDIO DEL MAR
RCP	RUTAS REPRESENTATIVAS DE CONCENTRACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (DEL INGLÉS REPRESENTATIVE CONCENTRATION)
RDAN	RENTA DISPONIBLE AJUSTADA NETA
SIG	SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
SST	SEA SURFACE TEMPERATURE
TWL	NIVEL DEL MAR TOTAL (DEL INGLÉS TOTAL WATER LEVEL)
VAB	VALOR AÑADIDO BRUTO

GLOSARIO

Adaptación al cambio climático: es el ajuste en los sistemas humanos y naturales en respuestas a los estímulos climáticos actuales, o esperables, o sus efectos, de tal manera que se reduzcan el daño o se aprovechen las oportunidades beneficiosas (IPCC, 2007).

Altura de ola significativa: es un parámetro estadístico definido a partir de un registro de oleaje como la altura de ola media del tercio de las mayores olas del registro.

Berma: zona cuasi-horizontal de la playa seca formada por la deposición de sedimentos debida a la acción del oleaje.

Cuantil de una variable (ej. de altura de ola): valor de la variable asociado a una determinada probabilidad de ocurrencia o a un período de retorno.

Evento extremo: se trata de eventos que por su magnitud no se repiten con frecuencia, es decir, que tienen periodos de retorno elevados.

Exposición: hace referencia a las características físicas del frente costero.

Formulación de Bruun: fue la primera formulación propuesta, y la más conocida para evaluar el retroceso producido en una playa como consecuencia de un aumento local del nivel del mar (Bruun 1962).

Marea Astronómica: es el movimiento de ascenso-descenso del nivel del mar por efecto de la atracción gravitatoria de los astros.

Marea Meteorológica: Sobreelevación del nivel del mar producido en la costa debido a la acción del viento y los cambios de presión.

Nivel del mar total (TWL): es el nivel que alcanza el mar debido a la acción conjunta de la marea astronómica, la marea meteorológica y el set-up generado por las olas.

Nivel Medio del Mar: Se conoce como nivel del mar a aquel que se toma como referencia para determinar la altitud de diversas localidades y accidentes geográficos.

Peligrosidad: fenómeno de origen climático o derivado de la actividad humana que puede causar daños sociales, económicos o medioambientales (adaptado de UNISDR 2009).

Percentil de una variable (ej. de altura de ola): valor de la variable asociado a una determinada probabilidad de ocurrencia o a un período de retorno. Es un tipo de cuantil en el que la distribución queda dividida en cien partes.

Periodo de retorno: intervalo medio de tiempo, generalmente expresado en años, al cabo de los cuales se igualará o superará un suceso de una determinada magnitud.

Proyecciones de cambio climático: son los valores de una determinada variable (por ejemplo nivel del mar) estimados para el futuro bajo distintos escenarios de cambio climático.

Profundidad de cierre del perfil: límite del perfil de playa a partir del cual el oleaje deja de influir en la forma del perfil

Renta Disponible Ajustada Neta: es el resultado de sumar a la renta regional disponible las transferencias sociales en especie, que incluyen las prestaciones gratuitas de sanidad y educación, entre otras.

Riesgo: la combinación de un suceso y sus consecuencias negativas (adaptado de UNISDR 2009).

Sistema natural costero: es el sistema formado por distintos rasgos costeros y ecosistemas tales como costas rocosas, playas, dunas y flechas de arena, estuarios y lagunas, deltas, desembocaduras de ríos, humedales y corales. Estos elementos ayudan a definir los límites costeros entre el mar y la tierra, además de proporcionar una amplia variedad de servicios de regulación del clima, de suministro o culturales.

Sistema socioeconómico costero: es el sistema que incluye el medio construido (e.g. asentamientos urbanos, infraestructuras de transporte, carreteras, alcantarillado o abastecimiento), actividades humanas (e.g. turismo, acuicultura y pesquerías) así como instituciones formales e informales que organizan las actividades humanas (e.g. políticas, leyes, costumbres, normas y culturas).

Stock de capital: comprende el conjunto de activos fijos durables utilizados directamente en la producción de bienes y servicios y resulta de los flujos de inversión pasados, de su composición por tipos de activo y del ritmo de depreciación de cada uno de estos.

Tasa de descuento: es una medida económico-financiera que se aplica para determinar el valor actual de un coste futuro. Puede adoptar distintos valores según se trate de un coste privado o público.

Temperatura Superficial del Mar: es la temperatura del agua del mar en la superficie.

Valor Añadido Bruto: la riqueza generada durante un periodo considerado obtenida como la diferencia entre el valor de la producción y los consumos intermedios utilizados como materias primas, servicios y suministros exteriores, etc.

Vulnerabilidad: son las características y circunstancias de una comunidad, sistema o activo que lo hacen susceptible a los efectos dañinos de un peligro (adaptado de UNISDR 2009).

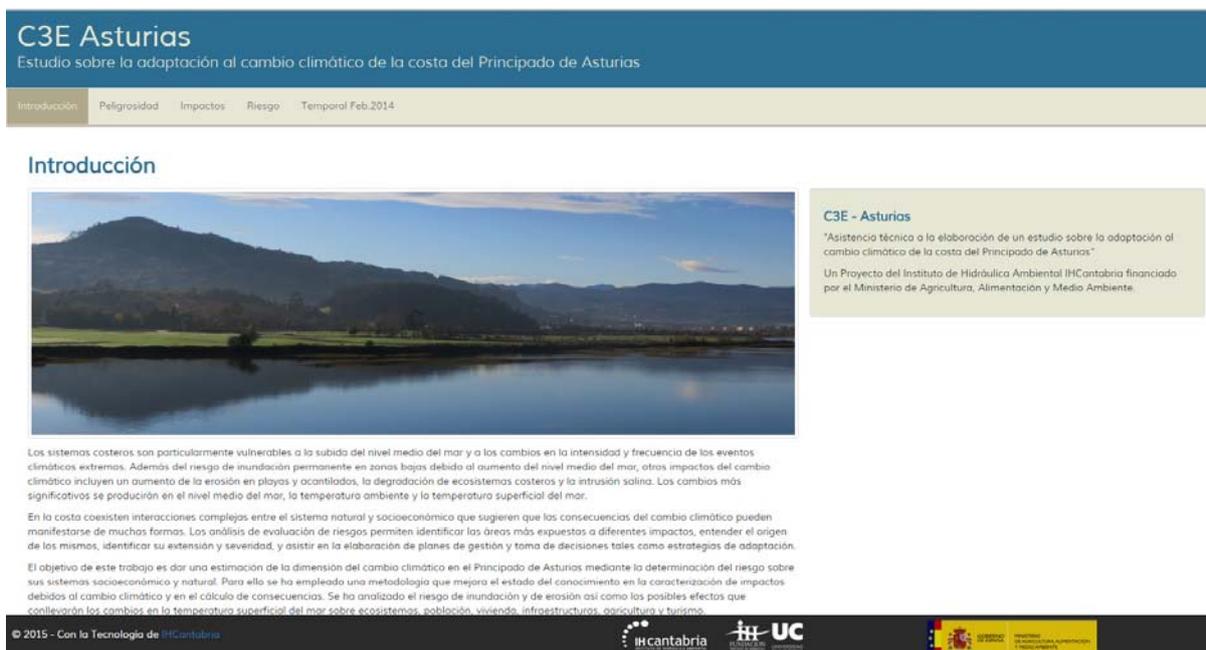
1. INTRODUCCIÓN

El estudio "ASISTENCIA TÉCNICA A LA ELABORACIÓN DE UN ESTUDIO SOBRE LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA COSTA DEL PRINCIPADO DE ASTURIAS" comprende un análisis de trescientos cuarenta y cinco kilómetros de costa que albergan acantilados de gran altitud, más de doscientas playas con características muy distintas y veinticuatro puertos. En objetivo fundamental de este trabajo es el de dar una estimación de la dimensión del cambio climático en el litoral asturiano. La estimación del riesgo planteada supone un paso más en el estudio del cambio climático en la costa y sienta bases más sólidas para el planteamiento de estrategias y medidas de adaptación. Para ello se ha empleado una metodología que mejora el estado del conocimiento en la caracterización de impactos y en el cálculo de consecuencias sobre los sistemas socioeconómico y natural.

Se ha elaborado un visor de bases de datos que incluye los resultados obtenidos en las Actividades 1 y 2 del presente trabajo. Este visor puede consultarse en la siguiente dirección: <http://www.c3e-asturias.ihcantabria.com/>

A continuación, se presenta una descripción de los cuatro bloques que lo conforman: peligrosidad, impactos, riesgo y un análisis forense del temporal de febrero de 2014.

La figura 1.1 muestra la página principal del visor, en la que se describe el marco contextual y los objetivos principales del estudio.



C3E Asturias
Estudio sobre la adaptación al cambio climático de la costa del Principado de Asturias

Introducción Peligrosidad Impactos Riesgo Temporal Feb. 2014

Introducción

C3E - Asturias
"Asistencia técnica a la elaboración de un estudio sobre la adaptación al cambio climático de la costa del Principado de Asturias"
Un Proyecto del Instituto de Hidráulica Ambiental IHCantabria financiado por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

Los sistemas costeros son particularmente vulnerables a la subida del nivel medio del mar y a los cambios en la intensidad y frecuencia de los eventos climáticos extremos. Además del riesgo de inundación permanente en zonas bajas debido al aumento del nivel medio del mar, otros impactos del cambio climático incluyen un aumento de la erosión en playas y acantilados, la degradación de ecosistemas costeros y la intrusión salina. Los cambios más significativos se producen en el nivel medio del mar, la temperatura ambiente y la temperatura superficial del mar.

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 evaluación de riesgos permiten identificar las áreas más expuestas a diferentes impactos, entender el origen de los mismos, identificar su extensión y severidad, y asistir en la elaboración de planes de gestión y toma de decisiones tales como estrategias de adaptación.

El objetivo de este trabajo es dar una estimación de la dimensión del cambio climático en el Principado de Asturias mediante la determinación del riesgo sobre sus sistemas socioeconómico y natural. Para ello se ha empleado una metodología que mejora el estado del conocimiento en la caracterización de impactos debidos al cambio climático y en el cálculo de consecuencias. Se ha analizado el riesgo de inundación y de erosión así como los posibles efectos que conllevarán los cambios en la temperatura superficial del mar sobre ecosistemas, población, viviendas, infraestructuras, agricultura y turismo.

© 2015 - Con la Tecnología de IHCantabria

IHCantabria UC

GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

Figura 1.1. Visor C3E Asturias: introducción.

2. PELIGROSIDAD

La metodología propuesta tiene como base una buena definición de la peligrosidad, caracterizada a través de las dinámicas marinas (oleaje, nivel del mar, temperatura superficial del mar, etc.) y sus proyecciones a mitad y a final del siglo XXI.

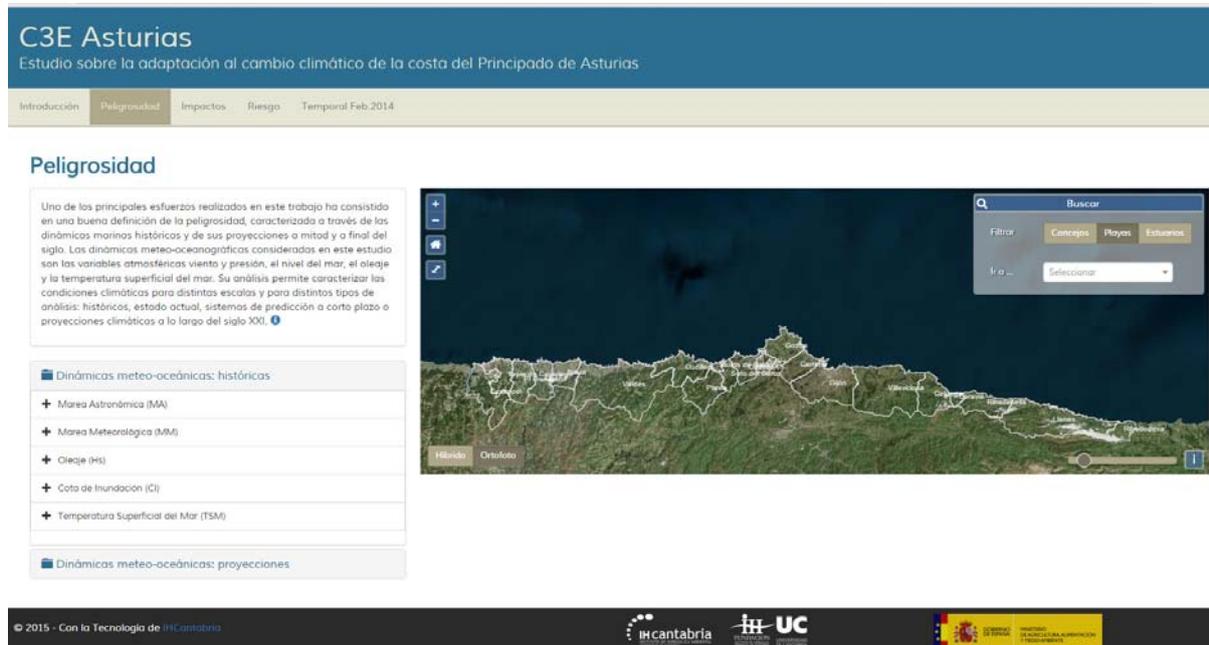


Figura 2.1. Visor C3E Asturias: peligrosidad.

2.1. Dinámicas

Uno de los principales esfuerzos realizados en este trabajo consiste en el análisis de las dinámicas generadoras de los impactos del cambio climático. Mediante el uso de bases de datos contrastadas y el empleo de sofisticadas técnicas estadísticas, ha sido posible su caracterización histórica.

A lo largo de la costa de Asturias se han elegido en torno a 500 puntos en los que se han obtenido las series históricas de oleaje (DOW, Camus et al. 2013) y de marea meteorológica (GOS, Cid et al. 2014) y se ha reconstruido la marea astronómica, variables de las que depende la inundación costera y cuya suma lineal y contemporánea da lugar a un índice de Cota de Inundación (CI). Para cada punto seleccionado se ha obtenido también el valor de la temperatura superficial del agua del mar, variable que desempeña un papel clave para el desarrollo y supervivencia de las especies, siendo uno de los factores más determinantes en sus patrones de distribución y funciones ecológicas.

Los distintos estadísticos que se presentan en el visor a lo largo del litoral asturiano son los que se muestran a continuación:

- **Marea Astronómica (MA)**

$MA_{MÁXIMA}$: Marea Astronómica máxima.

- **Marea Meteorológica (MM)**

$MM_{MÁXIMA}$: Marea Meteorológica máxima.

$MM_{95\%}$: Marea Meteorológica correspondiente al percentil del 95%.

- **Oleaje**

$Hs, MEDIA$: Altura de ola significativa media.

$Hs, 95\%$: Altura de ola significativa correspondiente al percentil del 95%.

- **Cota de Inundación (CI)**

$CI_{MÁXIMA}$: cota de inundación máxima.

CI_{MEDIA} : cota de inundación media.

$CI_{95\%}$: cota de inundación correspondiente al percentil del 95%.

- **Temperatura superficial del mar (TSM)**

$TSM_{MÁXIMA}$: Temperatura superficial del mar máxima.

TSM_{MEDIA} : Temperatura superficial del mar media.

$TSM_{MÍNIMA}$: Temperatura superficial del mar mínima.

La figura 2.1 muestra como el ejemplo la distribución espacial de la marea astronómica máxima a lo largo de la costa del Principado de Asturias.

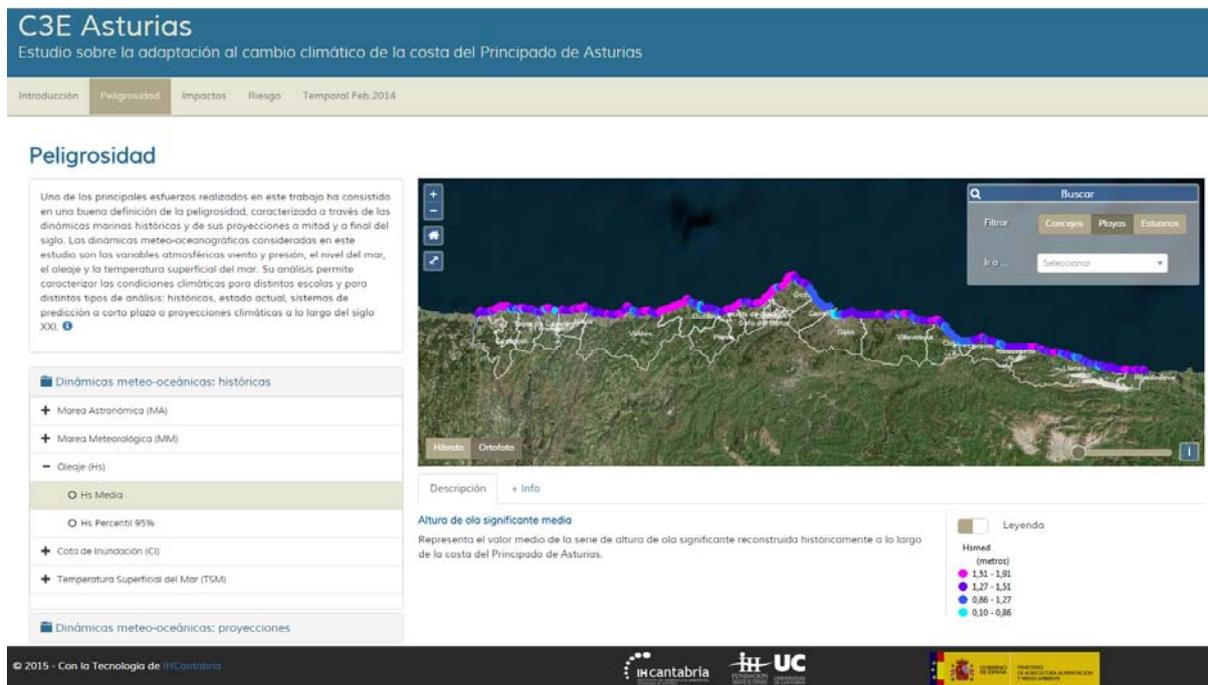


Figura 2.2. Visor C3E Asturias: Peligrosidad. Distribución espacial de la altura de ola significativa media a lo largo del litoral asturiano.

2.2. Proyecciones

La adaptación al cambio climático requiere de la evaluación del riesgo bajo distintos escenarios con el objetivo de valorar los futuros cambios y proponer medidas o estrategias de adaptación que permitan lograr unos objetivos de riesgo (mantener el riesgo presente, disminuirlo, etc). Para ello es necesario trabajar con escenarios basados en proyecciones climáticas y socioeconómicas.

En este estudio, las dinámicas marinas han sido proyectadas para distintos escenarios climáticos basados en rutas representativas de concentración (RCP de sus siglas en inglés) de gases de efectos invernadero (GEIs) del IPCC (IPCC, 2014). En la actualidad existen cuatro escenarios RCP con los que trabaja la comunidad científica y cada uno de ellos representa distintas evoluciones de las concentraciones de GEIs a lo largo del siglo XXI. Se han estimado las proyecciones de oleaje, nivel del mar y temperatura superficial del mar para los RCP4.5 y RCP8.5, que representan un escenario moderado y pesimista de emisiones de GEIs.

Dado que no son las dinámicas en sí las que producen impactos y consecuencias sino las alteraciones que éstas están sufriendo, el visor recoge los cambios que experimentará cada una de las variables climáticas consideradas:

- **Marea Meteorológica (MM)**

Cambios en:

$MM_{MÁXIMA}$: Marea Meteorológica máxima.

$MM_{95\%}$: Marea Meteorológica correspondiente al percentil del 95%.

Para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en los periodos 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099.

- **Oleaje**

Cambios en:

$H_{s, MEDIA}$: Altura de ola significativa media.

$H_{s, 95\%}$: Altura de ola significativa correspondiente al percentil del 95%.

Para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en los periodos 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099.

- **Nivel Medio del Mar (NMM)**

Cambios en:

NMM: Nivel Medio del Mar.

Para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 al año horizonte 2100.

▪ **Temperatura superficial del mar (TSM)**

Cambios en:

TSM_{MÁXIMA}: Temperatura superficial del mar máxima.

TSM_{MEDIA}: Temperatura superficial del mar media.

TSM_{MÍNIMA}: Temperatura superficial del mar mínima.

Para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en los periodos 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099.

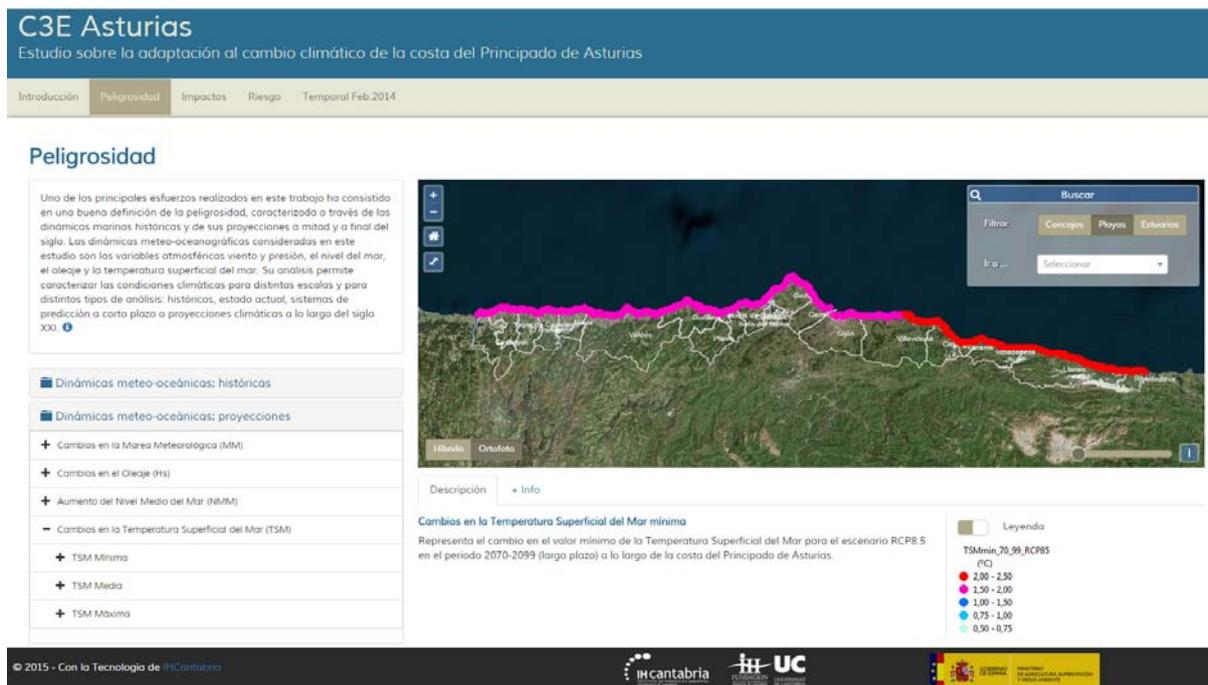


Figura 2.3. Visor C3E Asturias: Peligrosidad. Distribución espacial de los cambios en la temperatura superficial del mar mínima para el escenario RCP8.5 em el periodo 2070-2099.

3. IMPACTOS

Los impactos considerados en este estudio son la inundación costera, la erosión en playas y los cambios en las características morfológicas de los estuarios.

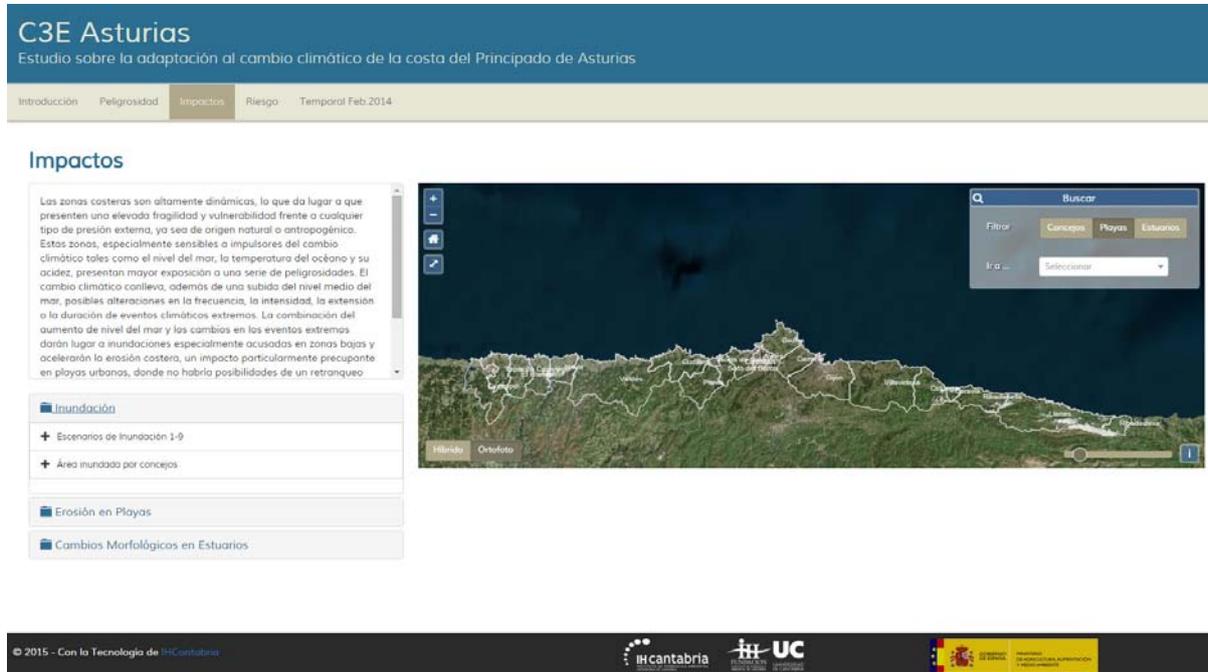


Figura 3.1. Visor C3E Asturias: impactos.

3.1. Inundación

La inundación costera se ha analizado bajo las hipótesis de distintos escenarios de cambio climático que combinan proyecciones de aumento del nivel medio del mar y eventos extremos, estos últimos tratados estadísticamente.

La caracterización del impacto se ha llevado a cabo mediante un modelo hidrodinámico bidimensional que utiliza la propia topografía como sub-elemento de la malla de cómputo. Dada la importancia de emplear un Modelo Digital de Terreno (MDT) de muy alta resolución, se ha mejorado la calidad del MDT basado en datos LIDAR del IGN del que se dispone mediante la incorporación de las defensas portuarias digitalizadas a partir de planos. Se muestran los mapas de inundación máxima obtenidos tras el modelado y gráficos espaciales del área afectada en cada concejo para cada uno de los escenarios propuestos.

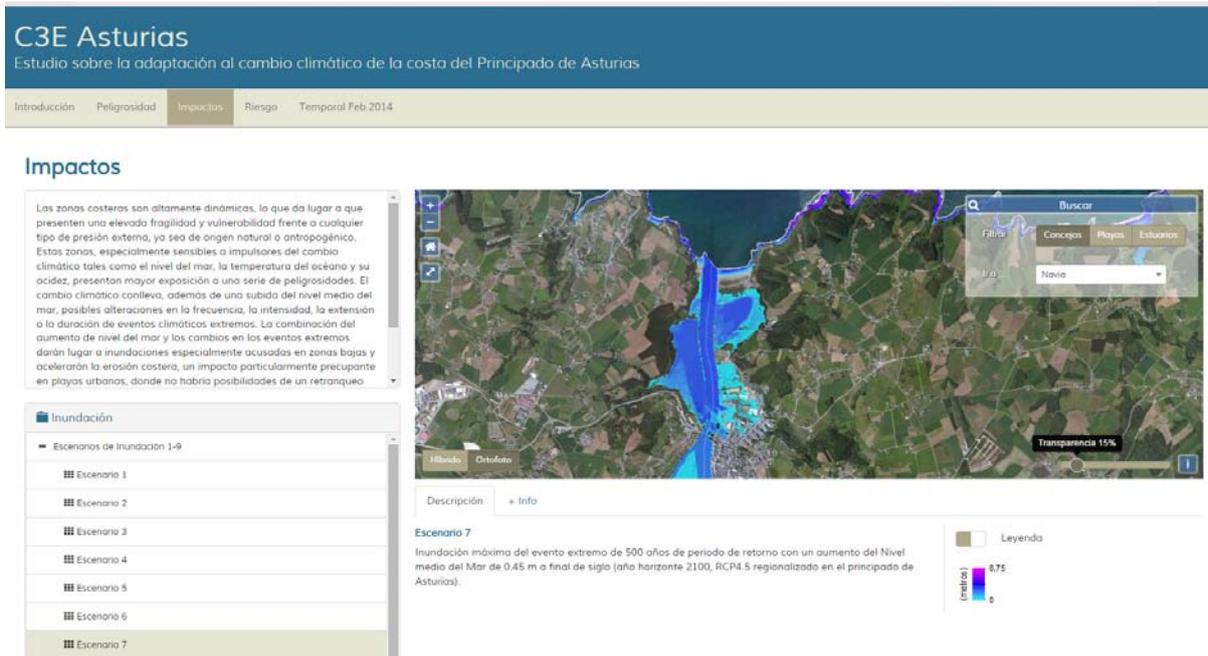


Figura 3.2. Visor C3E Asturias: impactos. Inundación en Navia.

En lo que respecta a los resultados obtenidos en playas urbanas, cabe indicar que, dada su casuística, sería necesario realizar un estudio de detalle muy específico para cada una de ellas y modelar con muy alta resolución la interacción entre el flujo y la estructura. No obstante, y dado que esto queda fuera del alcance de este proyecto, se pretende dar una estimación del impacto al que se verían sometidas en caso de no actuar frente al cambio climático.

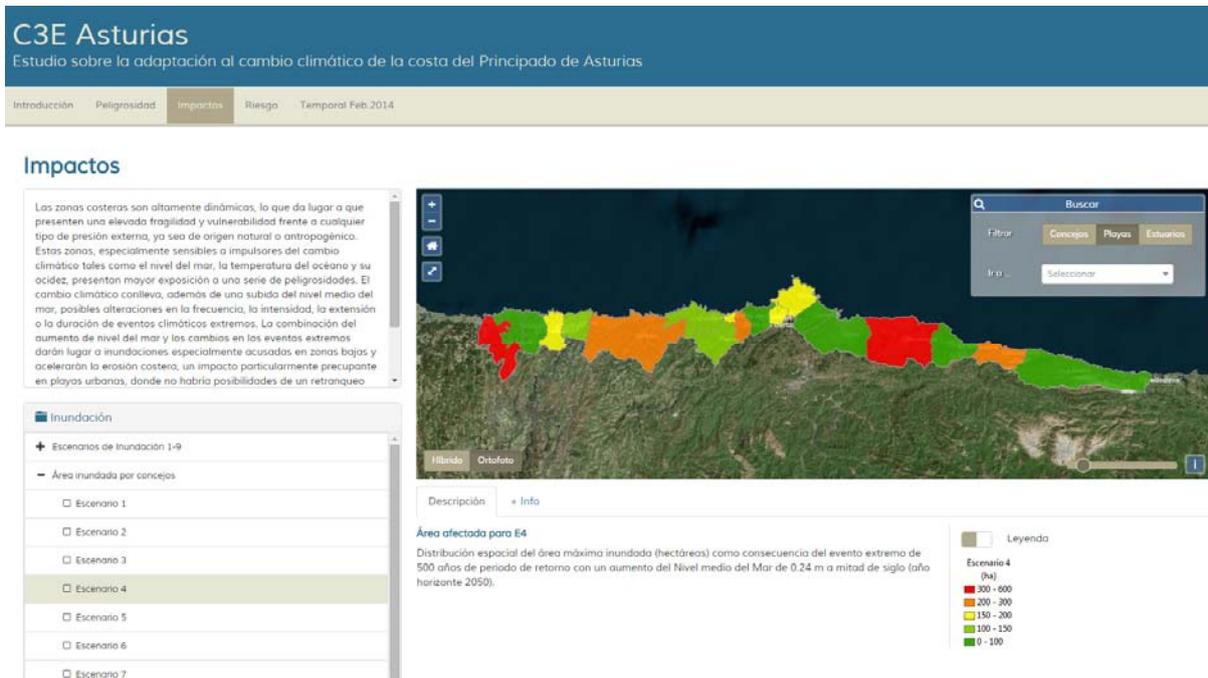


Figura 3.3. Visor C3E Asturias: impactos. Área inundada.

3.2. Erosión en playas

La caracterización de la erosión se ha llevado a cabo en 57 playas del litoral asturiano, todas ellas con una longitud igual o mayor a 200 m y con tipología de sedimento arena.

Un parámetro importante en la forma del perfil de playa es la profundidad de cierre (h^*), límite a partir del cual el oleaje deja de influir en la forma del perfil. El valor medio anual de la profundidad de cierre, relacionada con la zona activa de transporte sedimentario, depende fundamentalmente de la altura de ola que es superada 12 horas al año (H_{s12}), de la sucesión de los temporales y de la persistencia de los mismos. Se muestra la distribución espacial de la H_{s12} de cada una de las playas de estudio a lo largo del litoral asturiano.

- **Caracterización del clima actual de erosión:** Se presenta, para cada playa seleccionada, la reconstrucción de las series temporales de erosión-acreción de la línea de costa obtenidas con el modelo de Miller y Dean (2004) para el periodo 1947-2014 y la variabilidad interanual de la erosión acumulada en invierno.

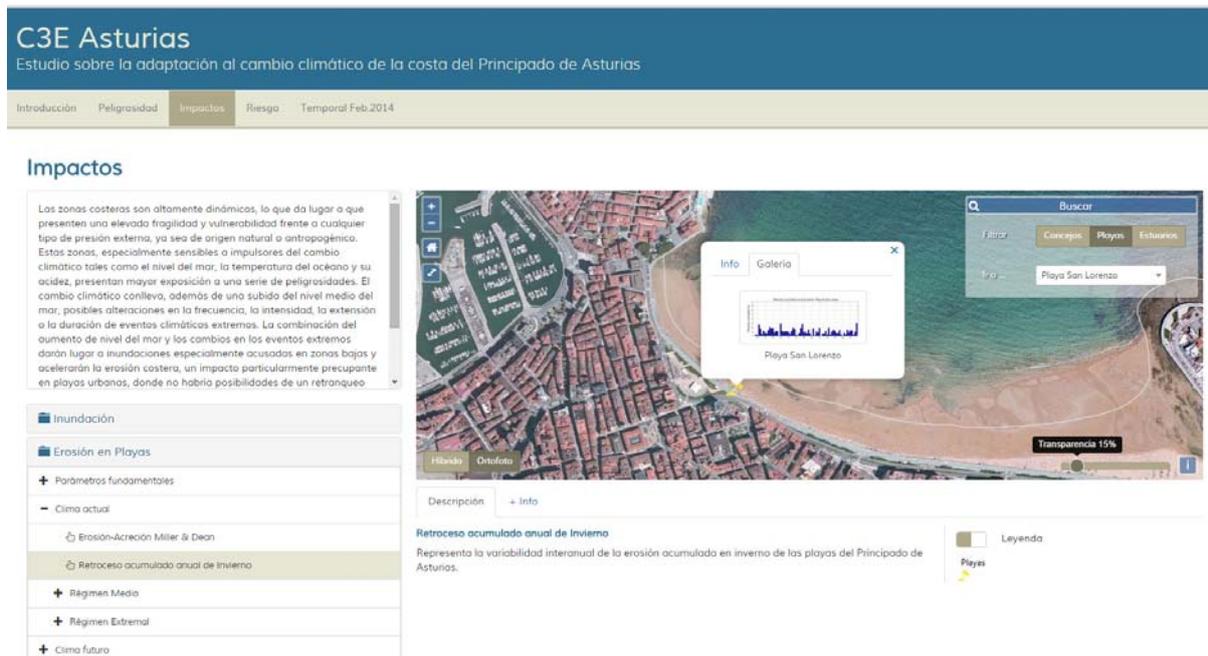


Figura 3.4. Visor C3E Asturias: impactos. Retroseso acumulado anual de invierno en la playa de San Lorenzo.

- **Caracterización del clima futuro de erosión:** La conocida "Regla de Bruun" establece que un ascenso del nivel medio del mar provocará un retroceso del perfil de playa. Se muestra la distribución espacial de los retrocesos por aumento del nivel medio del mar obtenidos con el modelo Bruun (1983), la superficie de playa potencialmente perdida y el volumen de sedimento necesario para mantener el riesgo actual en cada escenario de cambio climático propuesto. Sin embargo, para evaluar el retroceso de la línea de costa a medio y largo plazo no es suficiente con tener en cuenta el aumento del nivel medio del mar sino que otras variables, como son la marea meteorológica, la marea astronómica y el oleaje, deben ser tenidas en cuenta. Por ello, y tras estudiar diversas aproximaciones para agregar los efectos del corto plazo al aumento del nivel

medio del mar, se muestra el retroceso medio, el retroceso asociado al percentil del 95%, los cuantiles de retroceso de 5, 10, 25 y 50 años de periodo de retorno para, para los escenarios de aumento de nivel de 0.24 m a 2050 y 0.45 m, 0.65 m y 1 m a 2100. Además, se presentan en cada caso indicadores de erosión que resultan de dividir cada cuantil de retroceso extremal entre la anchura de playa.

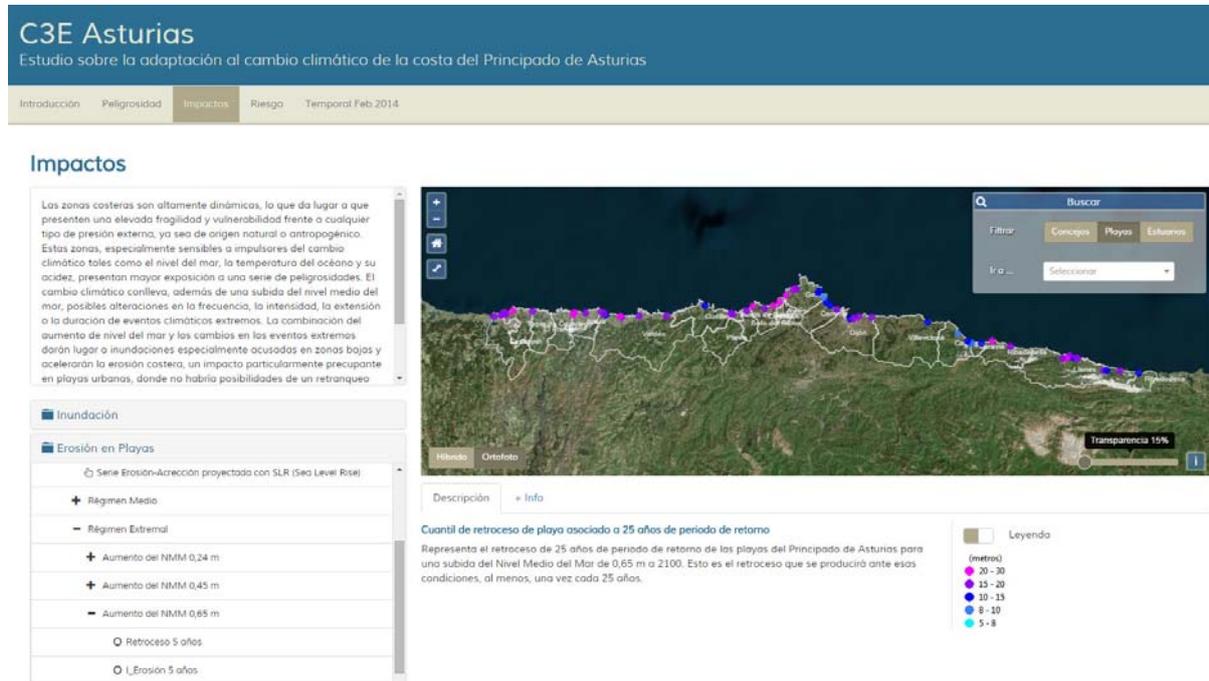


Figura 3.5. Visor C3E Asturias: impactos. Cuantil de retroceso de línea de costa de 25 años de período de retorno.

Los resultados son muy conservadores pues, a falta de datos de campo, ha necesario asumir ciertas hipótesis simplificadoras como suponer todas las playas encajadas, el tamaño del grano homogéneo en cada una de ellas, la altura de berma constante y la conservación del sedimento en el sistema. Por otro lado, y especialmente tras los últimos temporales marítimos, la anchura media de playa empleada está sobreestimada. Por ello, para analizar cada playa en detalle sería necesario un estudio específico con campañas batimétricas que queda fuera del alcance de este trabajo.

3.3. Cambios morfológicos en estuarios

La configuración morfológica media de un estuario depende de sus condiciones hidrodinámicas y de los aportes sedimentarios que recibe. Aunque también intervienen los caudales fluviales (líquido y sólido) y el oleaje, el parámetro fundamental es el prisma de marea, que responde al volumen de agua que entra y sale de un estuario durante los ciclos de mareas vivas. Este parámetro es susceptible de verse afectado tanto por la variación del nivel del mar debida al cambio climático como por el crecimiento de las cotas de los bajos interiores, pudiéndose ver modificada la hidrodinámica con los consiguientes efectos morfológicos asociados.

Con este propósito de analizar los efectos del cambio climático sobre las características morfológicas de los principales estuarios asturianos (desembocadura, bajos exteriores,

una canal principal, canales secundarios y bajos interiores), se han planteado dos tipos de metodologías distintas:

- **Metodología general basada en la aplicación de modelos de equilibrio:** Se presentan los cambios sobre las áreas y volúmenes de equilibrio de los distintos elementos morfológicos de los estuarios Eo, Navia, Nalón, Avilés, Villaviciosa y Ribadesella.
- **Metodología de detalle basada en modelos de procesos:** Se muestran los cambios morfológicos que se producirán en Villaviciosa como consecuencia del aumento del nivel medio del mar a mitad y a final de siglo.

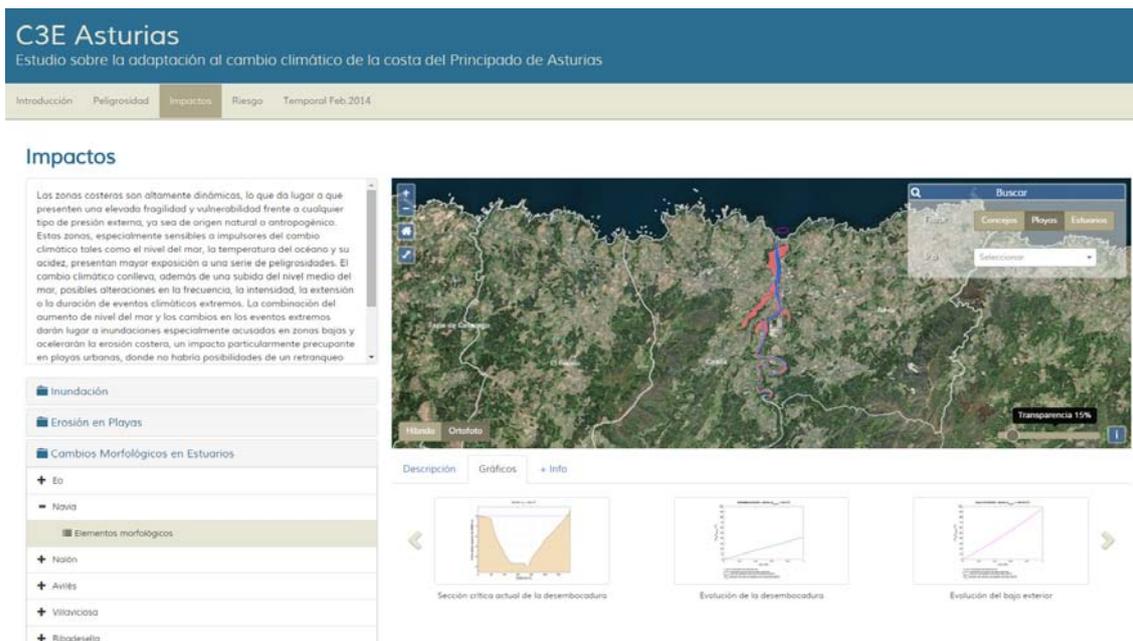


Figura 3.6. Visor C3E Asturias: impactos. Cambios en los elementos morfológicos del estuario de Navia.

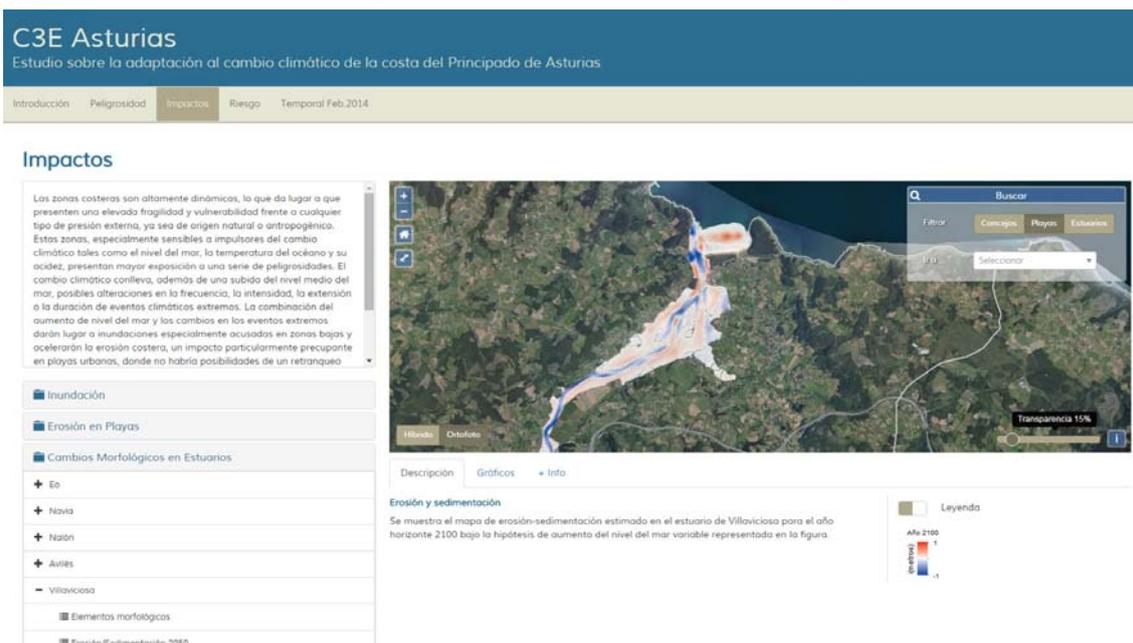


Figura 3.7. Visor C3E Asturias: impactos. Erosión/sedimentación en Villaviciosa a 2100.

4. RIESGO

Los sistemas costeros son particularmente vulnerables al aumento del nivel medio del mar y a los cambios en la intensidad y frecuencia de las inundaciones. Además del riesgo de inundación permanente en zonas bajas debido al aumento del nivel medio del mar, otros impactos del cambio climático incluyen un aumento de la erosión en playas y acantilados, la degradación de ecosistemas costeros y la intrusión salina.

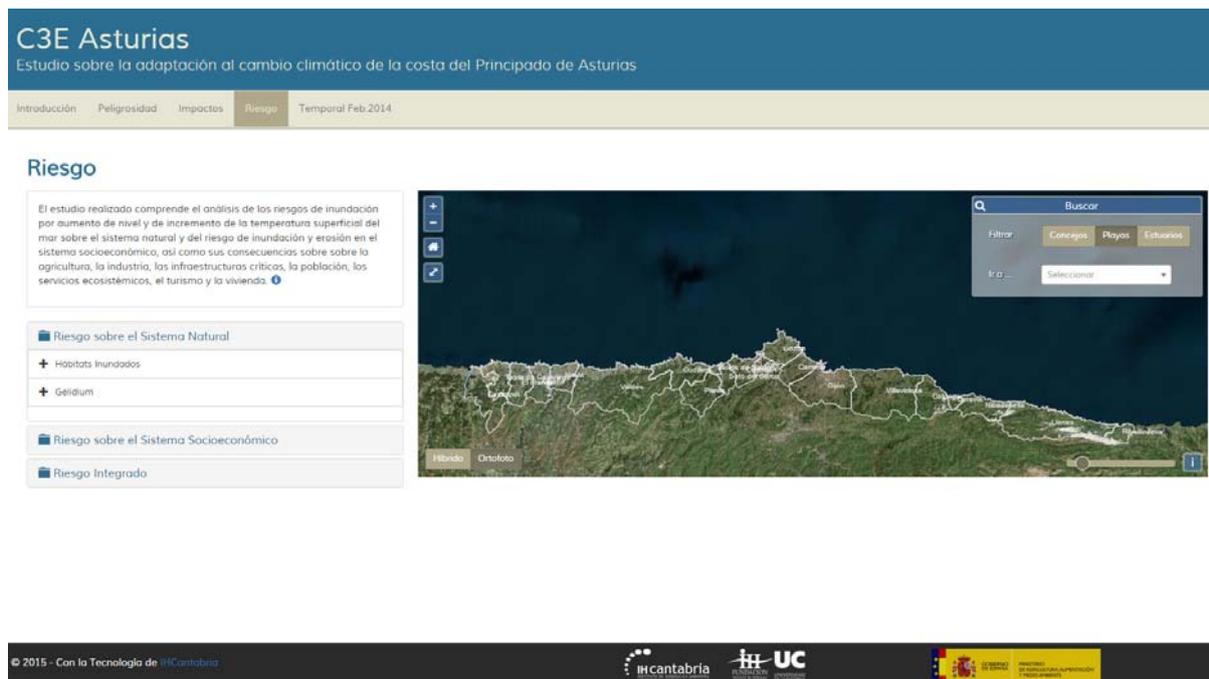


Figura 4.1. Visor C3E Asturias: riesgo.

El análisis del riesgo que se plantea está enmarcado dentro de una metodología más general de riesgo adoptada por el IPCC. En este marco más general, el concepto de riesgo se basa en la combinación de la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad, configurando lo que se conoce como el triángulo del riesgo (Schneiderbauer y Ehrlich, 2004).

4.1. Riesgo sobre el sistema socioeconómico

Se muestran las consecuencias sobre el sistema socioeconómico derivadas del impacto de inundación para una serie de escenarios de riesgo propuestos, que combinan eventos extremos y aumento del nivel medio del mar. Los escenarios de riesgo, además de contemplar cambios en las variables climáticas, tienen en cuenta cambios en las variables socioeconómicas. Se han empleado las proyecciones de población elaboradas por el Gobierno del Principado de Asturias y se ha determinado el crecimiento tendencial para el resto de variables: stock de capital, Renta Disponible Ajustada Neta (RDAN) y Valor Añadido Bruto (VAB).

El problema de evaluar y comparar fenómenos que ocurren en distintos momentos del tiempo se resuelve introduciendo una tasa de descuento que minimiza el peso de los daños a medida que se alejan en el tiempo. Como resultado de aplicar este método, se tiene una idea de la cuantía del esfuerzo inversor que resultaría tolerable en el presente para resolver problemas de daños futuros. Sin embargo, esto hace que se pueda ver de forma distorsionada la importancia de eventos que pese a ser graves están alejados en el tiempo. En este estudio se presentan los resultados de las dos formas: sin descontar, para caracterizar la gravedad de un escenario, y descontados, para evaluar la importancia relativa de los escenarios en distintos años horizontes.

Las consecuencias sobre la población, las viviendas asturianas, la industria y la producción industrial, agrícola y de servicios ecosistémicos se presentan en mapas espaciales con un código de colores en los que se refleja el porcentaje de daño potencial para cada escenario considerado. Además, se incluyen las infraestructuras críticas afectadas.

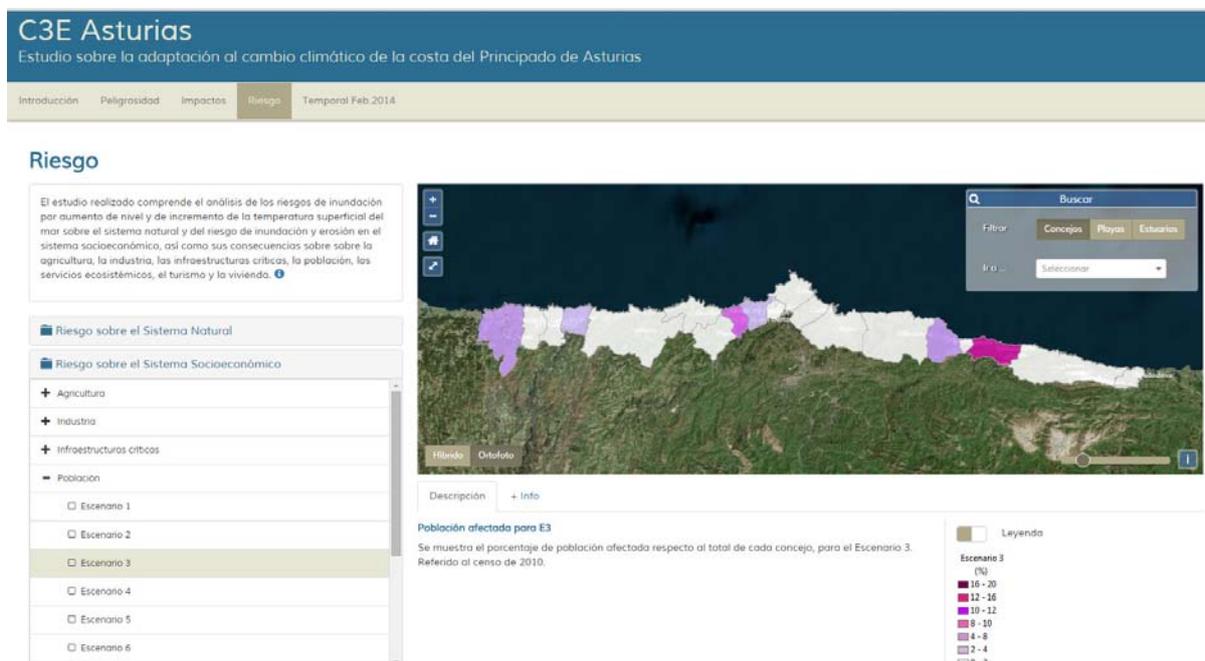


Figura 4.2. Visor C3E Asturias: riesgo sobre el sistema socioeconómico. Población expuesta.

Por otro lado, se han estimado las consecuencias que conlleva la erosión de playas sobre el turismo en términos de millones de euros de pérdida de valor de uso recreativo, también representadas mediante mapas espaciales con un código de colores. En este caso, los escenarios de riesgo sólo consideran cambios en el nivel medio del mar.

4.2. Riesgo sobre el sistema natural

Se ha evaluado el riesgo derivado de los impactos del cambio climático sobre las especies y ecosistemas costeros en la costa de Asturias, en concreto aquellos derivados del aumento de la temperatura superficial del mar y del potencial incremento del nivel medio de mar, con los consecuentes procesos de inundación.

Dada su importancia en la estructuración y producción del ecosistema submareal del litoral cantábrico, se han obtenido los cambios en la probabilidad de ocurrencia del alga roja *Gelidium corneum* por efecto del aumento de la temperatura superficial del mar. Se muestra la variabilidad de los resultados a lo largo del litoral asturiano.

Los ecosistemas costeros se localizan en zonas de poca elevación, por lo que se encuentran directamente expuestos a cambios en las dinámicas marinas como consecuencia del cambio climático. En dichos ecosistemas se integra una gran variedad de hábitats y especies que forman un mosaico de gran complejidad tanto física como biológica. Se ha realizado un análisis de en la franja costera y se muestran los hábitats y figuras de protección en riesgo de inundación permanente por un metro de aumento del nivel medio del mar.

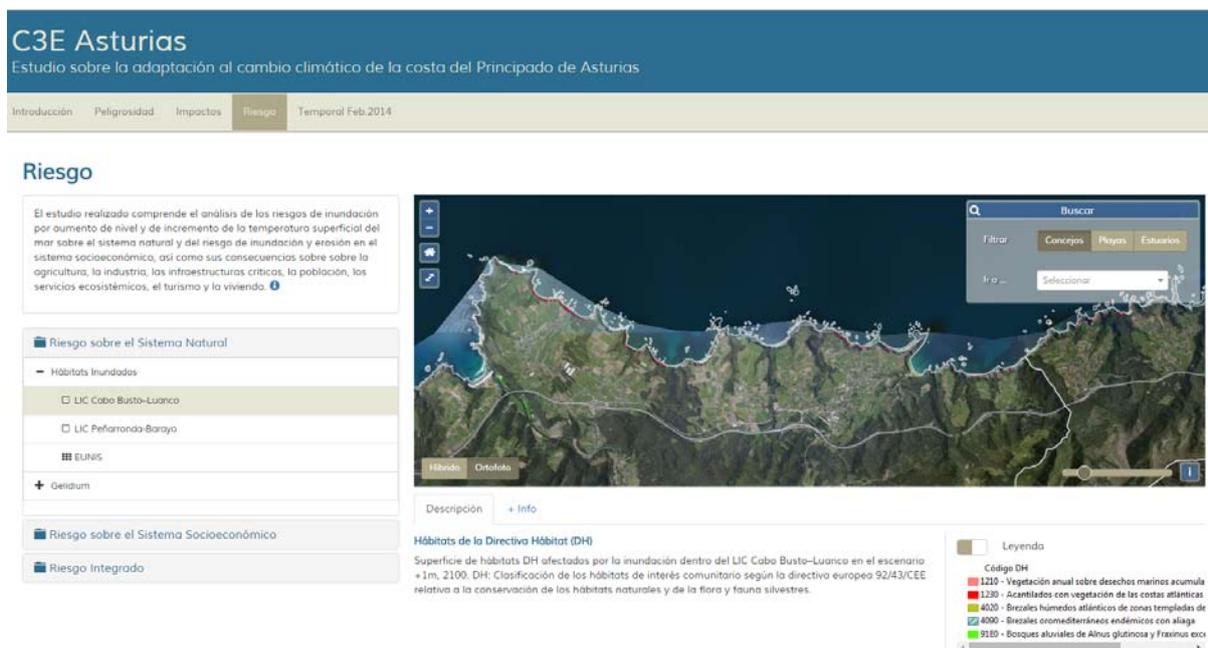


Figura 4.3. Visor C3E Asturias: riesgo sobre el sistema natural. Hábitats inundados.

4.3. Riesgo integrado

La gestión del riesgo de inundación asociado al cambio climático requiere de una estrategia multisectorial y sostenida a distintos horizontes temporales. En este estudio se propone como objetivo mantener el nivel de riesgo actual.

Los resultados obtenidos muestran la distribución espacial del riesgo, necesaria para conocer las localizaciones que constituyen una prioridad para la implementación de medidas de adaptación.

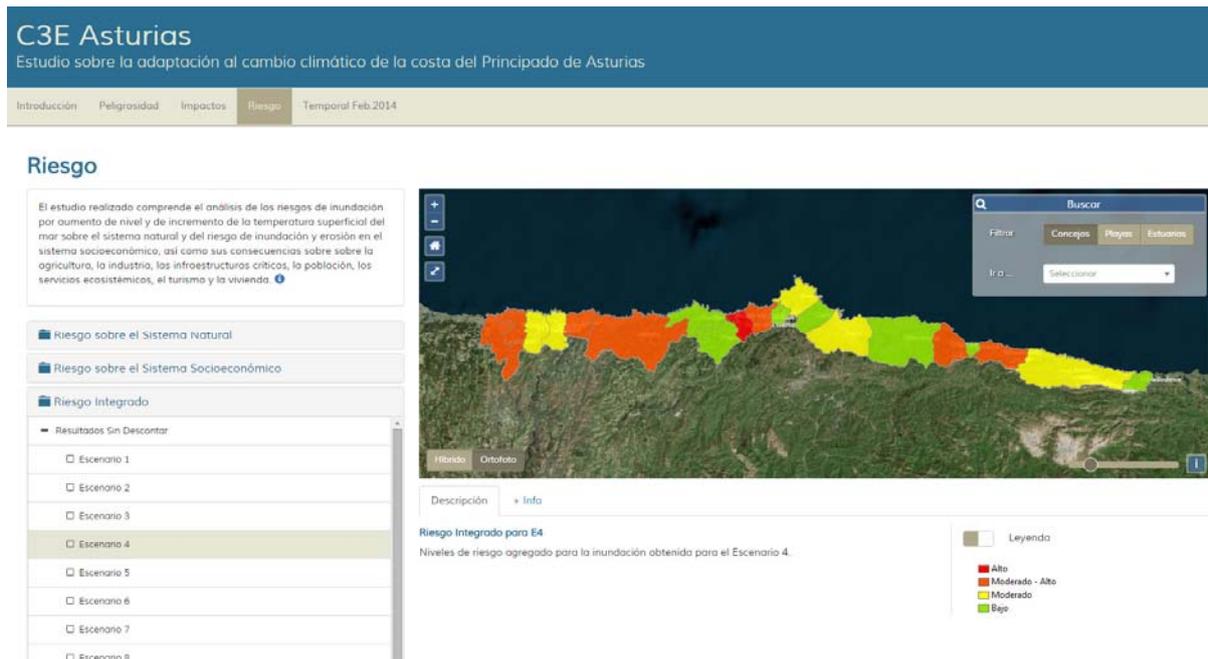


Figura 4.2. Visor C3E Asturias: riesgo integrado.

5. TEMPORAL DE FEBRERO DE 2014

IHCantabria realizó una campaña de campo para evaluar los daños causados por el temporal en el Principado de Asturias. Con este objetivo, se discretizó la costa asturiana en cuatro zonas y se dispuso un equipo de trabajo en cada una de ellas. Se visitaron playas, puertos y estuarios para evaluar su grado de afección, se midió la extensión aproximada de la inundación en base a marcas de agua y testigos oculares, se tomaron fotos y se grabaron algunos vídeos. Tras finalizar los trabajos, se crearon bases de datos en Sistemas de Información Geográfica (SIG) con información espacial sobre el alcance de los eventos y se realizaron diversos inventarios.

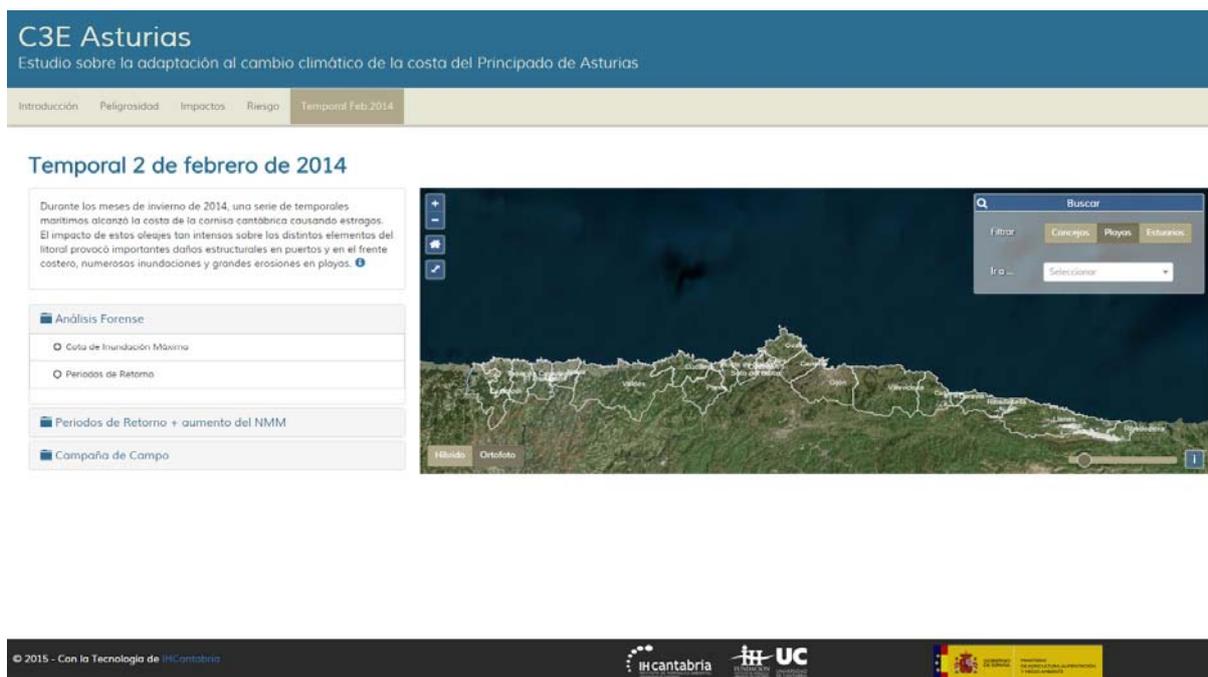


Figura 5.1. Visor C3E Asturias: riesgo integrado.

5.1. Análisis forense

Durante los meses del invierno de 2014, una serie de temporales marítimos alcanzó la costa de la cornisa cantábrica causando estragos. El impacto de estos oleajes tan intensos sobre los distintos elementos del litoral provocó importantes daños estructurales en puertos y en el frente costero, numerosas inundaciones y grandes erosiones en playas.

La reconstrucción histórica del TWL a lo largo de la costa del Principado de Asturias ha permitido, no sólo analizar su régimen extremal, sino caracterizar la excepcionalidad de los temporales ocurridos durante el invierno. Se muestra la variabilidad que el periodo de retorno del temporal del 2 de febrero de 2014 presentó en el litoral asturiano, oscilando entre los 20 y los 200 años, y alcanzando los máximos valores al oeste de Cabo Peñas y en algún punto frente a la costa de Ribadesella.

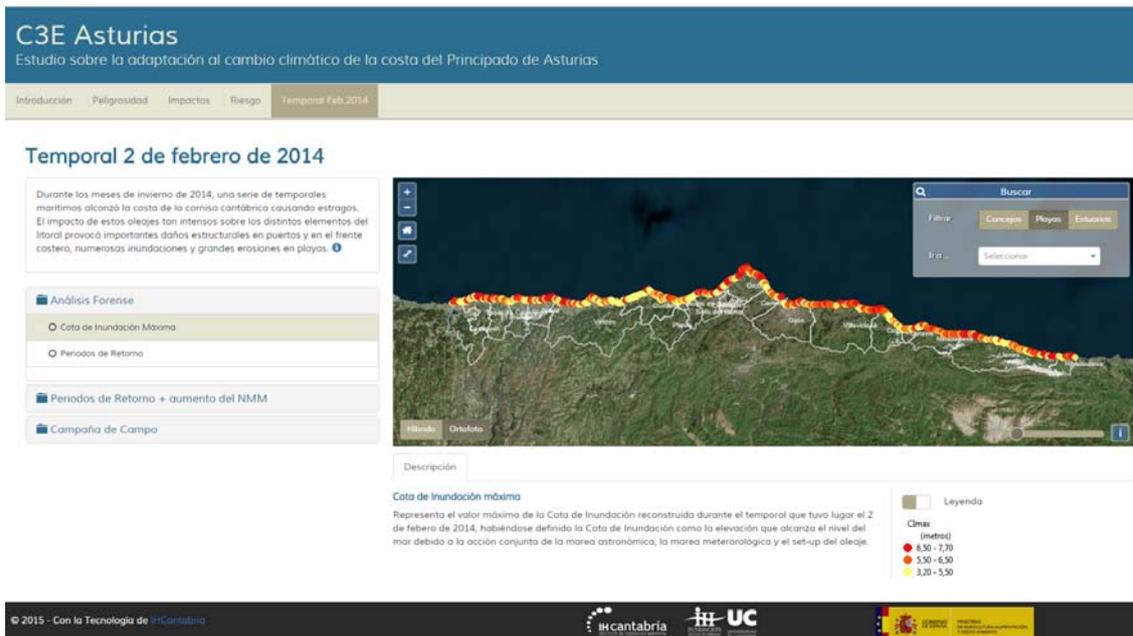


Figura 5.2. Visor C3E Asturias: temporal 2 de febrero de 2014. Cota de inundación máxima alcanzada durante el temporal del 2 de febrero de 2014 en Gozón.

5.2. Cómo afecta el aumento del nivel medio del mar a la frecuencia de los temporales marítimos

La subida del NMM reducirá la excepcionalidad de fuertes temporales marítimos, como los acontecidos durante el invierno de 2014 haciéndolos mucho más frecuentes de lo que lo son actualmente. Se muestra cómo cambiará el periodo de retorno de un temporal de las mismas características que el que tuvo lugar en febrero de 2014 considerando 0.24, 0.65 y 1 m de incremento de nivel medio de las aguas.

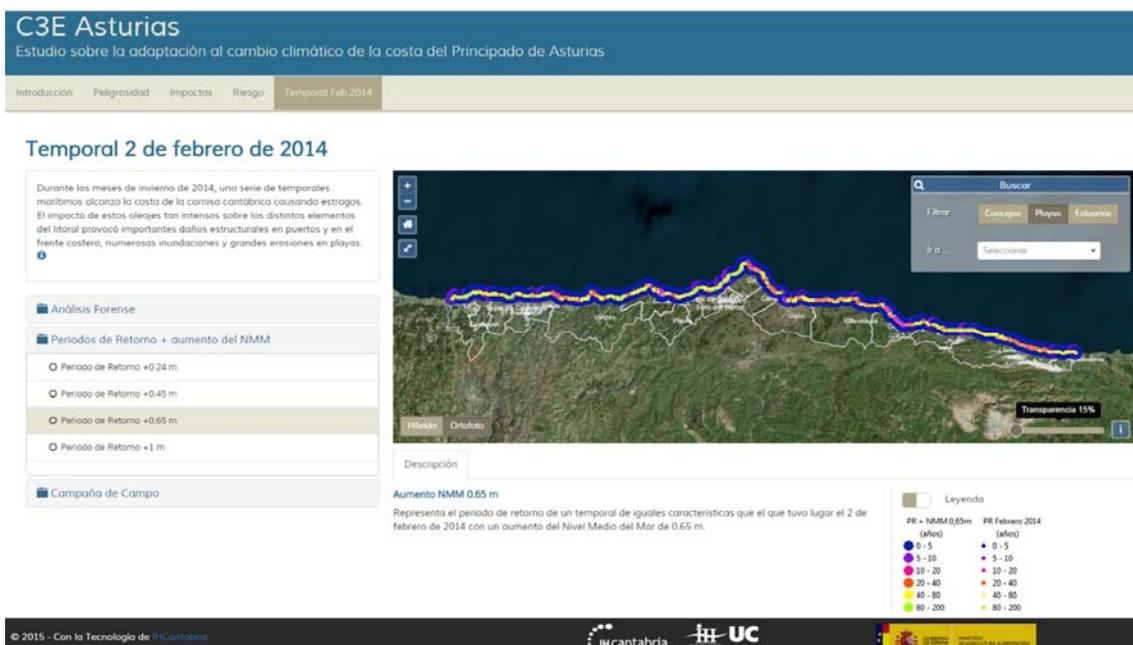


Figura 5.3. Visor C3E Asturias: Temporal 2 de febrero de 2014. Cambios en el periodo de retorno de un temporal de similares características al de febrero de 2014.

5.3. Campaña de campo

Se presenta una serie de fotografías de playas, puertos y estuarios tomadas durante la campaña de campo realizada por IHCantabria tras el temporal de febrero de 2014.

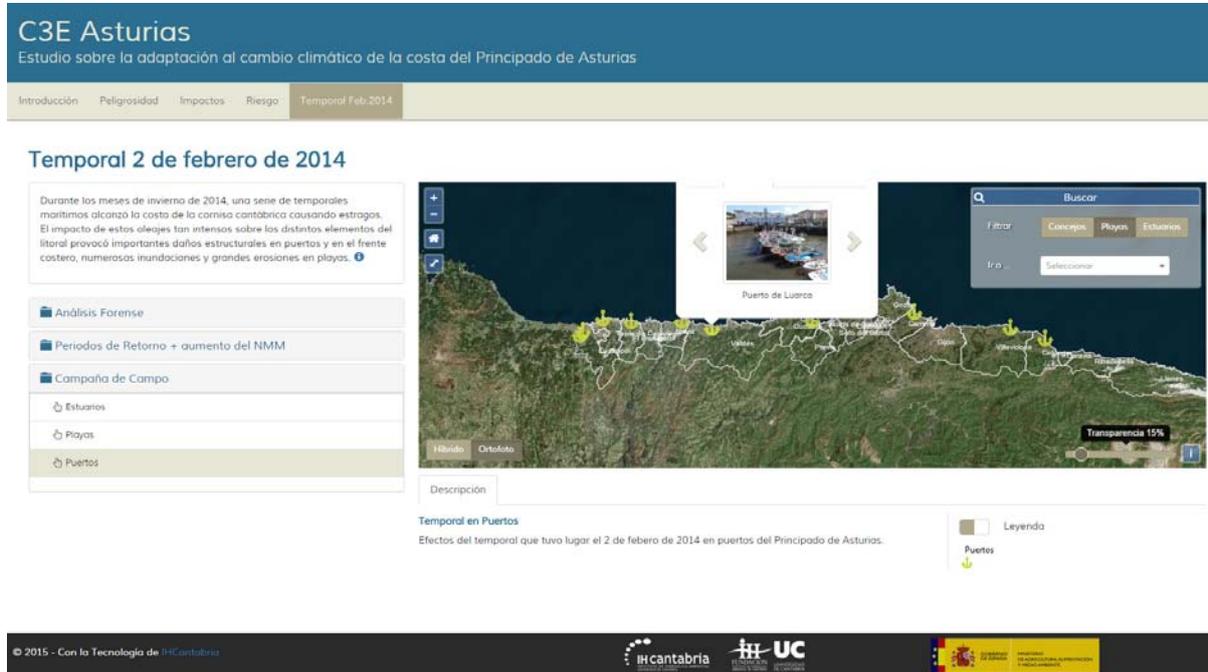


Figura 5.4. Visor C3E Asturias: Temporal 2 de febrero de 2014. Imágenes del Puerto de Luarca.

6. ACERCA DE LOS RESULTADOS

Es importante señalar que no se está realizando un pronóstico de daños que aspire a ser certero, es decir a prever lo que realmente va a ocurrir, sino más bien un ejercicio de ensayo en el que se presenta lo que podría observarse en un territorio ante escenarios de riesgo. Este ensayo pretende ser representativo de posibles evoluciones de la sociedad afectada, mostrando la variación de las consecuencias que se podrían percibir para así poder mostrar cómo podrían contribuir las estrategias de adaptación con las que cuenta la sociedad y evaluar su posible aportación al bienestar social.

Los resultados que se presentan en este estudio son, por tanto, indicadores de la susceptibilidad actual de la población y de los ecosistemas así como de las consecuencias a las que se podría llegar ante la inacción. No se ha tenido en cuenta la reubicación de asentamientos urbanos en riesgo, la migración de especies ni el aprendizaje y maduración de la sociedad, entre otros aspectos que se indican a lo largo del documento.

Por otro lado, existen ciertas limitaciones asociadas a los datos disponibles y a los modelos numéricos empleados, que deben tenerse en consideración para interpretar de forma adecuada los resultados. Estas limitaciones se muestran de forma detallada a lo largo de los distintos informes que recoge este trabajo.

7. REFERENCIAS

- Bruun, P., 1962. Sea-level rise as a cause of shore erosion. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of the Waterways and Harbors Division 88, 117 – 130.
- Camus P., F.J. Méndez, R. Medina, A. Tomas and C. Izaguirre, 2013. High resolution Downscaled Ocean Waves (DOW) reanalysis in coastal areas. Coastal Engineering, 72, 56-68.
- Cid, A., S. Castanedo, A.J. Abascal, M. Menendez and, R. Medina, 2014. A high resolution hindcast of the meteorological sea level component for Southern Europe: the GOS dataset. Climate Dynamics, doi: 10.1007/s00382-013-2041-0.
- Gobierno del Principado de Asturias: www.asturias.es (último acceso: marzo de 2015).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007. Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II. Contribution to the IPCC 4th Assessment Report.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II. Contribution to the IPCC 5th Assessment Report.
- Schneiderbauer, S., and D. Ehrlich, 2004. Risk, Hazard and People's Vulnerability to Natural Hazards: A Review of Definitions, Concepts and Data. Luxembourg: Office for Official Publication of the European Communities.
- UNISDR, 2009. Terminology on Disaster Risk reduction. International Strategy for Disaster Reduction.