

P N A C C

Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático

Cambio Climático en la Costa Española



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE

Cambio Climático en la Costa Española



Madrid, 2014



Autores:

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

Cristina Izaguirre Lasa, Investigadora de IH Cantabria.

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

Investigadores de IH Cantabria participantes en el proyecto:

Iñigo J. Losada Rodríguez, Director del Proyecto.

Fernando J. Méndez Incera, Coordinador del Proyecto.

Otros investigadores: Sheila Abad Herrero, Ana Julia Abascal Santillana, Paula Camus Braña, Sonia Castanedo Bárcena, Omar Castellanos Ballesteros, Alba Cid Carrera, Gabriel Díaz Hernández, Antonio Espejo Hermosa, Felipe Fernández Pérez, Patricia Fernández Quintana, Borja González Reguero, Yanira Guancho García, Miriam Jimenez Tobio, Felipe Maza Fernández, Raul Medina Santamaría, Melisa Menendez García, Roberto Mínguez Solana, Luis Pedraz Polo, Jorge Pérez García, Antonio Tomás Sampedro y Marco Antonio Vega Marichalar.

Coordinadores:

Eduardo González Fernández; José Ramón Picatoste

D.G. Oficina Española de Cambio Climático. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Revisores:

Aída Velasco Munguira; José Ramón Picatoste

D.G. Oficina Española de Cambio Climático. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.



MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACION Y MEDIO AMBIENTE

Edita:

© Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente
Secretaría General Técnica
Centro de Publicaciones

Distribución y venta:

Paseo de la Infanta Isabel, 1
28014 Madrid
Teléfono: 91 347 55 41
Fax: 91 347 57 22

Impresión y encuadernación:

Taller del Centro de Publicaciones del MAGRAMA

Diseño y maquetación:

MAGRAMA

NIPO: 280-14-127-9 (papel)

NIPO: 280-14-126-3 (línea)

ISBN: 978-84-491-1403-8

Depósito Legal: M-20443-2014

Tienda virtual: www.magrama.es
centropublicaciones@magrama.es

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:

<http://publicacionesoficiales.boe.es/>

Datos técnicos: Formato: 21x29,7 cm. Caja de texto: 16,5x23 cm. Composición: Una columna. Tipografía: Calibrí a cuerpo 10. Encuadernación: Rústica Fresado. Papel: Igloo de 90 gramos. Cubierta cartulina gráfica mate de 250 gramos. Tintas: 4.

En esta publicación se ha utilizado papel libre de cloro de acuerdo con los criterios medioambientales de la contratación pública.

A efectos bibliográficos este trabajo debe citarse como sigue:

Losada, I., Izaguirre, C. & Diaz, P. 2014. *Cambio climático en la costa española*. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid, 133 pág.

El proyecto ha sido financiado por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente y realizado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria.

Las opiniones que se expresan en esta obra son responsabilidad de los autores y no necesariamente del MAGRAMA o de su personal.



ÍNDICE DE CONTENIDO

LISTA DE ACRÓNIMOS	IX
GLOSARIO	XI
PRESENTACIÓN	XIII
RESUMEN EJECUTIVO	1
1. INTRODUCCIÓN	5
2. EL SISTEMA COSTERO EN ESPAÑA	7
2.1. UN LITORAL Y VARIAS VERTIENTES.....	7
2.1.1. <i>La vertiente mediterránea</i>	9
2.1.2. <i>La vertiente atlántica</i>	10
2.1.3. <i>Los archipiélagos</i>	12
2.2. DINÁMICAS DE LA COSTA ESPAÑOLA.....	13
2.3. LOS SISTEMAS NATURALES DE LA COSTA ESPAÑOLA	15
2.4. EL SISTEMA SOCIOECONÓMICO EN LA COSTA ESPAÑOLA	20
2.5. LA COSTA ESPAÑOLA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO	21
3. FACTORES DE CAMBIO	24
3.1. INTRODUCCIÓN	25
3.2. NIVEL DEL MAR RELATIVO	27
3.2.1. <i>Nivel medio del mar global</i>	29
3.2.2. <i>Nivel medio del mar regional</i>	32
3.2.3. <i>Nivel medio del mar local</i>	36
3.3. FACTORES CLIMÁTICOS DE CAMBIO.....	37
3.3.1. <i>Extremos de nivel del mar</i>	38
3.3.2. <i>Oleaje y viento</i>	40
3.3.3. <i>Temperatura superficial del agua del mar</i>	47
3.3.4. <i>Acidificación de los océanos</i>	48
3.3.5. <i>Contribuciones de agua dulce</i>	49
3.4. FACTORES ANTROPOGÉNICOS DE CAMBIO	49
3.4.1. <i>Hipoxia</i>	50
3.4.2. <i>Desvío de caudales de agua dulce</i>	50

3.4.3. Pérdida de hábitat	51
3.4.4. Retención de sedimentos.....	51
3.4.5. Desarrollo socioeconómico.....	52
4. ESCENARIOS PARA LA PROYECCIÓN DE IMPACTOS Y RIESGOS.....	59
4.1. ESCENARIOS CLIMÁTICOS.....	59
4.2. ESCENARIOS NO CLIMÁTICOS: CAMBIOS EN LA VULNERABILIDAD.....	61
5. IMPACTOS EN ZONAS COSTERAS	64
5.1. IMPACTOS OBSERVADOS EN LA COSTA ESPAÑOLA	65
5.1.1. Inundación.....	65
5.1.2. Intrusión salina.....	70
5.2. IMPACTOS PROYECTADOS EN LA COSTA ESPAÑOLA	72
5.2.1. Inundación y retroceso de la costa.....	73
5.2.2. Cambio potencial de la intrusión salina.....	81
6. CONSECUENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA ESPAÑOLA.....	83
6.1. INTRODUCCIÓN	84
6.1.1. Escenarios propuestos.....	85
6.1.2. Metodología para el análisis del riesgo	87
6.1.3. Indicadores económicos de riesgo.....	88
6.1.4. Análisis desarrollado.....	89
6.1.5. Incertidumbres y necesidades de información.....	92
6.2. EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS SOBRE EL SISTEMA NATURAL.....	95
6.2.1. Pérdida potencial de humedales.....	95
6.2.2. Consecuencias de la inundación por efecto del cambio climático sobre los servicios ambientales de los ecosistemas del Cantábrico y Noratlántico	102
6.2.3. Pérdida potencial de praderas de <i>Posidonia oceanica</i>	107
6.3. EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS SOBRE EL SISTEMA SOCIOECONÓMICO	109
6.3.1. Pérdida de operatividad y fiabilidad en puertos	109
6.3.2. Consecuencias sociales del cambio climático en la costa del Cantábrico.....	113
6.3.3. Dimensión y prioridades de actuación de las consecuencias económicas del cambio climático en la costa del Cantábrico.....	115
REFERENCIAS	126

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Algunas cifras sobre el litoral español.	8
Tabla 2.	Principales factores climáticos de cambio para los sistemas costeros, sus efectos, tendencias y proyecciones.	27
Tabla 3.	Proyecciones de nivel medio del mar global en m relativo al período 1986-2005, basado en la expansión termal de los océanos calculada mediante modelos climáticos, la contribución de los glaciares, Groenlandia y Antártida, y la contribución de reservas de agua terrestre.	31
Tabla 4.	Cuadro resumen de los estudios hechos sobre nivel del mar en España y sus principales conclusiones.....	34
Tabla 5.	Cuadro resumen de los estudios hechos sobre extremos de nivel del mar en España y sus principales conclusiones.....	40
Tabla 6.	Ocupación del suelo en la franja de 10 km de costa y comparación con España.	55
Tabla 7.	Tasas de crecimiento observadas (%) en los indicadores socioeconómicos estudiados para cada provincia de interés.	63
Tabla 8.	Tabla resumen de los escenarios de riesgo planteados para estimar las consecuencias sobre el sistema natural.	86
Tabla 9.	Tabla resumen de los escenarios de cambio climático planteados.	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Foto aérea del Delta del Ebro.....	9
Figura 2.	Marismas del Guadalquivir.....	11
Figura 3.	Isla de La Graciosa.....	12
Figura 4.	Playa de los Genoveses.....	16
Figura 5.	Dunas de Maspalomas.....	17
Figura 6.	Esquema conceptual de cómo el cambio climático afecta al sistema costero generando consecuencias sobre los sistemas humanos y naturales.....	23
Figura 7.	Tendencia y reconstrucción obtenida para el nivel medio del mar global.....	30
Figura 8.	Proyecciones e incertidumbre (rangos del 5 al 95%) de medias globales de aumento del nivel del mar y sus componentes en el período 2081 a 2100 (relativo al período 1986-2005) para los cuatro escenarios RCP y el escenario SRES A1B utilizado en el AR4.....	32
Figura 9.	Mapa con los cambios estimados del nivel del mar durante el periodo 1993-2012 a partir de datos de altimetría de satélite.....	33
Figura 10.	Proyecciones regionalizadas de aumento del nivel del mar (m) en el período 2081-2100 (con respecto al período 1986-2005) para los escenarios RCP4.5 (izquierda) y RCP8.5 (derecha) en las costas españolas.....	35
Figura 11.	Proyecciones del aumento del nivel medio del mar local (m) en el período 2081-2100 (con respecto al período 1986-2005) para los escenarios RCP4.5 (izquierda) y RCP8.5 (derecha) en las costas españolas incluyendo la subsidencia natural del Delta del Ebro y la desembocadura del Guadalquivir.....	37
Figura 12.	Marea meteorológica asociada a 50 años de período de retorno (izquierda) y tasa de cambio observada en los últimos 60 años en la marea meteorológica (derecha).....	38
Figura 13.	Cambios (cm) en el cuantil de marea meteorológica de 50 años de período de retorno en el período 2090-2099 para los escenarios A2, A1B y B1 con respecto al período 1990-1999 para sobreelevaciones positivas (a,b,c) y negativas (d,e,f).....	39
Figura 14.	Altura de ola media anual en profundidades indefinidas en el entorno español (izquierda) y período de pico medio en profundidades indefinidas en el entorno español (derecha).....	41

Figura 15.	Altura de ola asociada a 50 años de período de retorno en la costa española.....	43
Figura 16.	Tasa de cambios observados en el flujo medio de energía del oleaje (izquierda) y la potencia eólica (derecha) en los últimos 60 años.....	44
Figura 17.	Tendencia de cambio observada en los últimos 60 años en la altura de ola sólo superada 12 horas al año, H_{s12}	45
Figura 18.	Proyecciones de altura de ola media para el escenario A1B en el período 2070-2100.	47
Figura 19.	Población residente en la costa. 2009.....	53
Figura 20.	Densidad de población de los municipios costeros por provincias. 2009.....	54
Figura 21.	Flujos de intercambios principales en la franja costera de 10 km en España, 1987-2000-2006.	56
Figura 22.	Evolución de la playa de Benidorm (1960-2005).....	57
Figura 23.	Crecimiento de superficie artificial en los 10 km de costa entre 2000 y 2006, por provincia.	58
Figura 24.	Ejemplo de extrapolación de la tendencia de aumento de nivel del mar al año 2040. La referencia (valor del nivel del mar igual a 0) está situada en el valor medio del nivel del mar en el período 1960-1990.....	60
Figura 25.	Esquema de la cota de inundación y sus componentes (izquierda) y serie temporal de cota de inundación y sus componentes en Santander.	67
Figura 26.	Rango de marea astronómica a lo largo del litoral español.....	68
Figura 27.	Cota de inundación asociada a 50 años de período de retorno basado en datos históricos.	69
Figura 28.	Cota de inundación en playas disipativas asociada a 50 años de período de retorno basado en datos históricos.....	70
Figura 29.	Régimen medio de avance de cuña salina en el Delta del Ebro para la situación actual.....	72
Figura 30.	Porcentaje de cambio en la cota de inundación para el año 2040.....	73

Figura 31. Variación en la intensidad de la cota de inundación correspondiente a 50 años de período de retorno en la actualidad (paneles izquierdos) y variación del período de retorno correspondiente a la cota de inundación en la actualidad (paneles derechos) a lo largo de la primera mitad del siglo XXI en Bilbao y Barcelona.....	74
Figura 32. Cota de inundación asociada a 50 años de período de retorno en playas disipativas en el año 2040 (izquierda) y porcentaje de cambio en la cota de inundación respecto al siglo XX (derecha).	75
Figura 33. Proyecciones de la cota de inundación asociada a 50 años de período de retorno para tres escenarios de subida de nivel del mar.	76
Figura 34. Cota de inundación asociada a 50 años de período de retorno para los distintos escenarios de cambio climático por provincias.....	77
Figura 35. Porcentaje de cambio en la cota de inundación para los distintos escenarios de cambio climático por provincias.	78
Figura 36. Retroceso en playas debido a la subida del nivel del mar en el año 2040.	79
Figura 37. Retroceso en playas debido a cambios en la dirección del oleaje en el año 2040.....	80
Figura 38. Porcentaje de cambio en el transporte de sedimentos (acreción/erosión) para el año 2040.	81
Figura 39. Régimen medio de cuña salina en el Delta del Ebro bajo distintos escenarios de cambio en el caudal del río.	82
Figura 40. Régimen medio de cuña salina en el Delta del Ebro bajo distintos escenarios de aumento de nivel del mar.	82
Figura 41. Esquema conceptual de la estimación del riesgo.	87
Figura 42. Pérdida potencial de humedales (Ha) debido a la subida del nivel del mar para los escenarios de cambio climático C1-C4 en el Cantábrico.....	98
Figura 43. Pérdida de humedales (Ha) debido a la subida del nivel del mar para los escenarios de cambio climático C1-C4 en Galicia..	99
Figura 44. Pérdida de humedales (Ha) debido a la subida del nivel del mar para los escenarios de cambio climático C1-C4 en Andalucía.	100
Figura 45. Pérdida de humedales (Ha) debido a la subida del nivel del mar para los escenarios de cambio climático C1-C4 en Mediterráneo español.	102

Figura 46. Esquema de la evolución de la producción de un activo natural sometido a cambio climático.	104
Figura 47. Servicios ambientales prestados por los ecosistemas afectados por inundación permanente (izquierda) y eventos extremos de inundación (derecha) en términos de % sobre el PIB de 2008 de cada provincia, para los escenarios C1 a C3 en el año 2100.....	106
Figura 48. Pérdida de servicios ambientales prestados por los ecosistemas debido a inundación permanente (izquierda) y eventos extremos de inundación (derecha) para el escenario C4, en el año horizonte 2040.....	107
Figura 49. Porcentaje de cambio en el tiempo de superación de 3 m de altura de ola (cambio en las condiciones de navegabilidad) para el año 2040.....	111
Figura 50. Porcentaje de cambio en el rebase causado por el nivel del mar (izquierda) y por el oleaje (derecha) para el año 2040.. ..	112
Figura 51. Porcentaje de cambio en el peso de las piezas de dique en talud debido a la subida del nivel del mar (izquierda) y al oleaje (derecha) para el año 2040.	113
Figura 52. Porcentaje de población (referido al censo de 2008) expuesta a inundación permanente (panel izquierdo) y a eventos extremos de inundación (panel derecho) para los escenarios E1 a E3 en el año horizonte 2100.....	114
Figura 53. Porcentaje de población (referido al censo de 2008) expuesta a inundación permanente (panel izquierdo) y a eventos extremos de inundación (panel derecho) en el año horizonte 2040, considerando evolución de la población.. ..	115
Figura 54. Valor en el año 2100 del PIB afectado en el caso de inundación permanente (panel izquierdo) y eventos extremos de inundación (panel derecho) en términos de porcentaje sobre el PIB de cada provincia en 2008 para los escenarios E1 a E3.....	116
Figura 55. Valor medio anual del PIB afectado por el proceso de inundación gradual en el escenario E4 hasta el año 2040 (panel izquierdo) y valor del PIB afectado por eventos extremos de inundación en el año 2040 (panel derecho), en términos de porcentaje sobre el PIB de cada provincia en 2008. Se considera la evolución de la actividad económica.....	118
Figura 56. % de suelo urbano, agrícola, industrial o de infraestructuras afectado por inundación permanente respecto al suelo total del sector correspondiente por provincias.....	119
Figura 57. Valor en el año 2100 del VAB afectado por inundación permanente en los tres sectores (panel izquierdo) y por extremos de inundación (panel derecho) en términos de porcentaje sobre el PIB de cada provincia en 2008.. ..	120

Figura 58. Valor medio anual del VAB afectado por el proceso de inundación gradual en el escenario E4 hasta el año 2040 (panel izquierdo) y VAB afectado por extremos de inundación en el año 2040 (panel derecho) en términos de porcentaje sobre el PIB de cada provincia en 2008.. 121

Figura 59. Valor del stock de capital afectado por inundación permanente (panel izquierdo) y eventos extremos de inundación (panel derecho) en términos de porcentaje sobre el PIB de 2008. 123

Figura 60. Valor medio anual del stock de capital afectado por inundación permanente (panel izquierdo) y valor del stock de capital afectado por eventos extremos de inundación (panel derecho) en términos de porcentaje sobre el PIB de 2008 en el año 2040. 123

Figura 61. Evolución temporal de la RFBD afectada por provincias.. 125

LISTA DE ACRÓNIMOS

A1B	Escenario de cambio climático del IPCC de la familia A1
A2	Escenario de cambio climático del IPCC de la familia A2
AR4	Cuarto Informe de evaluación (Fourth Assessment Report)
AR5	Quinto Informe de evaluación (Fifth Assessment Report)
B1	Escenario de cambio climático del IPCC de la familia B1
BBVA	Banco Bilbao Vizcaya Argentaria
C3E	Cambio Climático en la Costa Española
CERC	Coastal Engineering Research Center
DIVA	Dynamic Interactive Vulnerability Assessment
ENOS	El Niño – Oscilación del Sur
GLOBE	Global Land One-Kilometer Base Elevation
IEO	Instituto Español de Oceanografía
INE	Instituto Nacional de Estadística
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change)
LiDAR	Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging
MDT	Modelo Digital del Terreno
PHN	Plan Hidrológico Nacional
PIB	Producto Interior Bruto
RCP	Rutas representativas de concentración (Representative Concentration Pathways)

RFBD	Renta Familiar Bruta Disponible
ROM	Recomendaciones de Obras Marítimas
SIOSE	Sistema de Información sobre la Ocupación del Suelo en España
SRES	Escenarios de emisiones (Special Report on Emissions Scenarios)
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
UE	Unión Europea
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization)
UNISDR	United Nations International Strategy for Disaster Reduction
VAB	Valor Añadido Bruto
VANE	Valoración de los Activos Naturales de España
WG1	Working Group 1

GLOSARIO

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.

Cota de inundación: es la cota que alcanza el nivel del mar debido a la acción conjunta de la marea astronómica, la marea meteorológica y el run-up generado por las olas.

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.

Dinámicas marinas: Conjunto de flujos de energía y agua (oleaje, niveles, corrientes) que interaccionan en el océano y la costa.

Driver: anglicismo utilizado para referirse a un generador de impacto de cambio climático.

Exposición: hace referencia a las características físicas del frente costero.

Factores antropogénicos de cambio: aquellos factores derivados de la actividad humana que originan cambios en el sistema costero como son el desarrollo socioeconómico, el desvío de caudales de agua dulce o la retención de sedimentos.

Factores climáticos de cambio: aquellos factores de origen climático cuyos cambios producen efectos en el sistema costero como son el nivel del mar, el oleaje, los niveles extremos del mar, el viento o las tormentas.

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).

Formulación del CERC: es la formulación más conocida y utilizada para el cálculo del transporte longitudinal de sedimentos y establece que la tasa de transporte a lo largo de la costa es proporcional al flujo de energía del oleaje evaluado en la zona de rompientes (USACE, 1984).

Incertidumbre: Expresión del grado en el que un valor es desconocido.

Peligrosidad: Fenómeno de origen climático o derivado de la actividad humana que puede causar daños sociales (e.g. pérdida de vidas), económicos o medioambientales (adaptado de UNISDR 2009).

Período 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.

Riesgo: La combinación de la probabilidad 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).

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).

Presentación

De acuerdo con el V Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) recientemente publicado, el calentamiento en el sistema climático es inequívoco, la influencia humana en el sistema climático es clara, y el cambio climático plantea riesgos para los sistemas humanos y naturales. El mismo informe indica que en las últimas décadas, el cambio climático ha afectado a los sistemas naturales y humanos en todos los continentes y océanos y que los impactos son más evidentes en los sistemas naturales -incluyendo los sistemas costeros- pero también se han observado en los sistemas humanos. No cabe duda de que tal afección se prolongará en el futuro.

El Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) es el marco nacional de referencia para el desarrollo y la coordinación entre las administraciones públicas de las acciones de evaluación de impacto, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático, y su objetivo último es la integración de los resultados de estas evaluaciones en la planificación y gestión de los sistemas ecológicos y los sectores socioeconómicos españoles. La Oficina Española de Cambio Climático del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente coordina el PNACC, que fue aprobado por Consejo de Ministros en octubre de 2006 y que se desarrolla a través de Programas de Trabajo, el Tercero de los cuales se ha adoptado en enero de este mismo año.

Las zonas costeras figuran como uno de los territorios prioritarios de acción del Tercer Programa de Trabajo del PNACC. Los efectos del cambio climático que se proyectan sobre las costas en nuestro país, de acuerdo con los futuros escenarios climáticos, señalan, entre otros cambios, un progresivo calentamiento del agua y una subida patente del nivel del mar a medida que avance el siglo XXI. Por todo ello, se hace prioritario progresar en la integración de las medidas que permitan anticipar su adaptación desde la planificación y la gestión costera, necesarias para minimizar dichos impactos.

La publicación que aquí se presenta es el principal resultado de un ambicioso proyecto elaborado en el ámbito del PNACC que ha abordado la evaluación de los posibles impactos del cambio climático sobre algunos de los componentes más significativos de las costas españolas. Pretende sentar unas bases sólidas que permitan poner en marcha las actuaciones preventivas necesarias para aumentar la capacidad de adaptación de nuestras costas. Este trabajo se ha realizado con el mejor conocimiento disponible sobre las proyecciones climáticas para el siglo XXI y sobre la configuración del litoral español, incluyendo datos relativos a población, ecosistemas y aspectos económicos. Los resultados aquí presentados no deben interpretarse como augurios de lo que va a suceder; no predicen, sino que proyectan situaciones futuras bajo unas premisas particulares sobre determinados aspectos del cambio climático y la respuesta de los sectores natural y socioeconómico ante sus efectos. Los modelos empleados permiten una afinación y realimentación permanente, a medida que mejoren el conocimiento de base sobre los modelos de clima global y las técnicas de regionalización, o a medida que se modifiquen los datos de población o riqueza utilizados en este estudio. Por todo ello, en el marco del proyecto aquí presentado, se pone a disposición de todos los usuarios la información manejada y las bases de datos generadas mediante un visor cartográfico que se puede consultar libremente a través de internet.

Susana Magro Andrade
Directora General de la Oficina Española de Cambio Climático

RESUMEN EJECUTIVO

Los sistemas costeros en España son especialmente sensibles a los efectos de la subida del nivel del mar, así como a otros factores climáticos de cambio tales como el aumento de la temperatura superficial del agua, la acidificación, los cambios en las tormentas o los cambios en el oleaje.

- El aumento del nivel del mar no es igual a lo largo de todas las costas del mundo. En España se han llevado a cabo varios estudios sobre el aumento en el nivel del mar en la costa española, obteniéndose tasas de aumento entre 2 a 3 mm/año durante el último siglo con importantes variaciones en la cuenca Mediterránea por efectos regionales.
- El aumento del nivel del nivel medio del mar en la zona Atlántico-Cantábrica sigue la tendencia media global observada entre 1,5 y 1,9 mm/año entre 1900 y 2010 y de entre 2,8 mm/año y 3,6 mm/año entre 1993 y 2010. Sin embargo, existe una mayor incertidumbre en cuanto al nivel medio del mar en el Mediterráneo por efectos regionales.
- El oleaje es una de las principales dinámicas susceptibles de cambio que afectan a nuestra costa. En las últimas 6 décadas se han observados importantes cambios tanto en intensidad como en dirección. En el Cantábrico se ha observado un aumento significativo de hasta 0,8 cm/año en el oleaje más intenso (percentil 95 de altura de ola significativa) y disminución en el Mediterráneo y Canarias. Asimismo, se han producido cambios significativos en la dirección del flujo de energía medio anual en la Costa Brava y sur del Delta del Ebro.
- Al igual que pasa en el resto del mundo, en España los impactos observados atribuibles al cambio climático son aquellos que corresponden a cambios en la temperatura del océano o a la acidificación. Con la información existente, los impactos observados relativos a inundación o erosión en zonas costeras no son atribuibles a cambio climático pues están altamente afectados por la acción del hombre.

El desarrollo socioeconómico, junto con otros factores de origen no climático como la hipoxia, desvío o variación de caudales en ríos, retención de sedimentos o pérdida de hábitat, potencian los impactos del cambio climático en la costa.

- En los últimos años se ha producido un aumento demográfico muy elevado en la franja costera. El ritmo de crecimiento anual de la población residente en municipios costeros fue de un 1,9 %, siendo superior en la fachada mediterránea, especialmente en Tarragona, Girona, Alicante y Castellón.
- En los últimos años se han producido notables cambios en los usos del suelo, produciéndose un crecimiento urbanístico en la costa que ha dado lugar a la rigidización de gran parte del litoral.

- Estos procesos han producido un aumento de la exposición y vulnerabilidad de la zona costera con un consiguiente aumento del riesgo.

Los sistemas costeros y, en especial, las zonas bajas como el Delta del Ebro, desembocaduras de los ríos y estuarios y marismas, experimentarán impactos adversos como la inundación costera y la erosión debido a la subida del nivel del mar y cambios en la dirección e intensidad del oleaje.

- Las playas, dunas y acantilados, actualmente en erosión, continuarán erosionándose debido al ascenso del nivel del mar y, en menor medida, por aumento en la intensidad del oleaje o cambios de dirección del mismo.
- Para cualquier escenario de aumento del nivel medio del mar, los mayores aumentos en % en la cota de inundación de las playas se producirán en la cuenca Mediterránea siendo, en términos absolutos, mayor la cota de inundación en la costas cantábrico-atlántica y canaria.
- Aunque las proyecciones de marea meteorológica tienen un elevado grado de incertidumbre, la subida del nivel del mar potenciará los eventos extremos de inundación aumentando su intensidad y especialmente su frecuencia.
- Considerando un escenario tendencial de aumento de nivel del mar a 2040 (aproximadamente 6 cm), las playas de la cornisa cantábrico-atlántica y norte de las Canarias experimentarán retrocesos medios cercanos a los 3 m, 2 m en el Golfo de Cádiz y valores medios entre 1 y 2 m en el resto de las fachadas.
- En cuanto a la intrusión salina, los mayores impactos se esperan en el Ebro por la combinación del aumento del nivel del mar con una posible reducción de caudales del río.

Entre las consecuencias más relevantes del cambio climático sobre los sistemas costeros naturales se encuentra la pérdida de praderas de *Posidonia oceanica*, ecosistema emblemático del Mar Mediterráneo, así como el desplazamiento de algunas especies, la pérdida de humedales y la pérdida de servicios ecosistémicos.

- Si el Mediterráneo occidental sufriera un aumento medio de $3,4 \pm 1,3^{\circ}\text{C}$ a finales de siglo la densidad de las praderas de *Posidonia* disminuiría hasta alcanzar el 10% de la densidad actual a mediados de este siglo (2049 \pm 10 años).
- Bajo los escenarios de cambio climático estudiados la pérdida principal de humedales se producirá en aquellos situados en el entorno de las ciudades o asentamientos urbanos o industriales, cuyos contornos han sido rigidizados impidiendo su adaptación. Este es el caso de la desembocadura del Nervión en Bilbao, la ría de Avilés o la ría de Ferrol.
- En el Cantábrico, con el escenario tendencial y horizonte 2040, las pérdidas económicas por inundación asociadas a los servicios ambientales prestados por los

ecosistemas costeros en ausencia de medidas de adaptación, varían entre el 0,01 y el 0,12 % del PIB provincial del 2008 dependiendo de la provincia. Cantabria, Coruña y Guipúzcoa son, en este orden, las más afectadas tanto ante inundación permanente como ante eventos extremos.

Si la tendencia en el aumento de la población, actividades y localización de bienes en la costa española continúa, se incrementará la exposición y vulnerabilidad costera. Los riesgos y consecuencias sobre el sistema socioeconómico debidas a eventos extremos de inundación ya experimentadas en la actualidad continuarán, y se verán agravadas, por los efectos del cambio climático y en especial por la subida del nivel del mar.

- Los puertos sufrirán alteraciones en sus condiciones de operatividad. El aumento del nivel del mar producirá una reducción general en el número de horas disponibles para realizar las operaciones en todos los puertos de España. Asimismo, la proyección de los cambios en el oleaje observados hasta el momento, hacen previsible que en 2040 se haya producido una reducción de la operatividad en los puertos del Cantábrico, sureste de las Islas Canarias y norte de Mallorca y un aumento de la misma en los puertos del Mediterráneo, si no se toman medidas de adaptación. En cuanto a la fiabilidad de las estructuras, el aumento del nivel del mar reducirá la fiabilidad de la mayor parte de las obras marítimas de los puertos de España, siendo este efecto contrarrestado en algunos casos (Mediterráneo principalmente) por los cambios del oleaje.
- Los citados impactos negativos por aumento del nivel medio del mar, se verán potenciados en el horizonte 2100 para cualquier proyección de aumento del nivel del mar considerada en todos los puertos españoles o infraestructuras localizadas en la costa (energía, transporte, abastecimiento, saneamiento, etc.) requiriendo la introducción de medidas de adaptación durante las próximas décadas.
- Ante un escenario de aumento del nivel medio del mar de 50 cm en el periodo 2081-2100, el incremento de la cota de las obras de protección frente a la inundación costera necesario para mantener la misma frecuencia de excedencias por eventos de inundación que la observada en el periodo 1986-2005, se sitúa entre 40 y 60 cm en el Cantábrico.
- Considerando escenarios tendenciales para el aumento del nivel del mar y la vulnerabilidad en la costa noratlántica, en el año 2040 la población afectada por inundación permanente estará en torno al 2-3% de la población total de las provincias de Coruña, Cantabria y Guipúzcoa en 2008. Para un incremento de nivel del mar medio de 50 cm en el horizonte 2100, el número de personas por provincia afectadas a lo largo de la costa entre Pontevedra y Guipúzcoa varía entre el 1% y el 4% de la población en 2008, siendo su distribución irregular por provincias. Tanto para 2040 como para 2100 las proyecciones se han realizado sin considerar medidas de adaptación.
- En la fachada costera, entre las provincias de Pontevedra y Guipúzcoa, a 2040 la proyección tendencial de la inundación permanente sin medidas de adaptación

implicaría unos costes entre el 0,4 y 1,5% del PIB anual provincial a 2008, considerando una tasa de descuento del 3%.

- Si se considera el evento extremo de inundación de periodo de retorno de 50 años a día de hoy y sin medidas de adaptación, las consecuencias económicas se distribuirían irregularmente entre las provincias de Pontevedra y Guipúzcoa alcanzando valores de entre el 0,4% y el 2,6 % del PIB provincial ante un evento extremo equivalente en 2040.
- Las infraestructuras son el principal activo expuesto en todas las provincias estudiadas. En la fachada noratlántica, para un escenario de subida de nivel del mar global de 85 cm (próximo al peor previsto por el IPCC) en el año 2100, más del 10 % del suelo correspondiente a infraestructuras se verá afectado en las provincias gallegas, llegando al 22 % en Coruña.

Los impactos y consecuencias producidas por el cambio climático ante cualquiera de los escenarios considerados pueden reducirse mediante la introducción de medidas de adaptación.

- Los costes de la adaptación a las condiciones climáticas proyectadas para finales del siglo XXI dependerán enormemente de la fachada costera en la que se localicen, las opciones de adaptación consideradas, del momento de su implementación y del daño residual que se asuma aceptable.
- Asimismo, la eficiencia de las opciones de adaptación al cambio climático implementadas dependerá enormemente de su interacción con las presiones que el hombre ejerza sobre la costa y sus consiguientes impactos.

1. INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras son áreas de gran riqueza en las que tienen lugar distintos procesos físicos, químicos y biológicos gobernados por complejas interacciones de flujos de agua. Consecuencia de ello es que las zonas costeras sean altamente dinámicas y que presenten una alta fragilidad y vulnerabilidad frente a cualquier tipo de presión externa, ya sea de origen natural o humano. El cambio climático es una de ellas, y el calentamiento global está dando lugar a cambios en el sistema climático que afectan directamente a los procesos costeros.

Desde el punto de vista socioeconómico, las zonas costeras son, hoy por hoy, áreas de vital relevancia para los países costeros, ya que albergan a la mayor parte de su población y un elevado porcentaje de sus actividades económicas. Baste decir que las zonas costeras con superficie por debajo de la cota 10 m suponen un 2% de la superficie continental, de la que un 13% se considera urbanizada. Sin embargo, este 2% contiene entorno al 10% de la población mundial (McGranahan et al., 2007; Satterthwaite et al., 2009), cifra que sigue en aumento.

La complejidad de las interacciones entre el sistema natural y el sistema socioeconómico que coexisten en la costa sugiere que las consecuencias del cambio climático puedan manifestarse de muchas maneras. El riesgo de inundación en zonas bajas y erosión costera son impactos particularmente preocupantes. Sin embargo, cambios en la temperatura del agua o la acidificación de los océanos pueden dar lugar a severos impactos en los estuarios y la vida marina.

La tendencia demográfica hacia la concentración de la población en las costas y el consiguiente desarrollo asociado, hace que los problemas actuales se puedan ver exacerbados en el futuro. Sirva de ejemplo, que se estima que la población hoy expuesta a una inundación con un periodo de retorno de 100 años pasará de 270 millones a 350 millones en 2050 debido al desarrollo socioeconómico (Jongman et al. 2012).

Además, la enorme concentración de la actividad humana en esta estrecha franja del territorio ha hecho que ricos e importantes ecosistemas y hábitat costeros hayan sufrido una importante degradación, por lo que los sistemas naturales afrontan un futuro incierto ante el cambio climático. Esta delicada situación representa un reto para los países costeros, que deben hallar la manera de gestionar la costa sin renunciar al bienestar y la prosperidad actuales y futuros.

La gestión de riesgos y la adaptación juegan un papel fundamental para afrontar este reto, pero una correcta aplicación de las mismas requiere un análisis y cuantificación de las consecuencias que los eventos extremos y el cambio climático pueden producir en la costa.

En este contexto, el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, consciente de esta necesidad, financió el proyecto Cambio Climático en la Costa Española (C3E) que fue coordinado por la Oficina Española de Cambio Climático y ejecutado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria.

Entre los objetivos de dicho proyecto se incluía la necesidad de: (1) aportar una visión de los principales cambios acontecidos en las costas españolas en décadas recientes, (2) proporcionar una cuantificación de los cambios futuros apoyada en diversos escenarios de cambio, (3) inferir los posibles impactos en horizontes de gestión de varias décadas, (4) proporcionar una visión de la vulnerabilidad actual de las costas ante los mismos y (5) establecer métodos, datos y herramientas para sucesivos pasos y análisis a escalas de mayor resolución espacial con el fin de establecer líneas de actuación encaminadas a la gestión responsable y la disminución de los riesgos, en aras de un desarrollo más sostenible y seguro del litoral español.

Este documento presenta un resumen extenso de algunos de los resultados más importantes que han sido obtenidos con las metodologías, herramientas y bases de datos generadas en el marco del proyecto. Existe además un visor cartográfico de toda la costa española que permite observar los impactos del cambio climático y que es accesible a través del siguiente enlace:

<http://www.c3e.ihcantabria.com/>

2. EL SISTEMA COSTERO EN ESPAÑA

La costa española cuenta con una amplia diversidad de ecosistemas y ambientes. Entre las principales zonas destacan la fachada Cantábrica, Mediterránea y el archipiélago de las Islas Canarias.

Las dinámicas marinas (oleaje, viento, mareas...) que bañan el litoral español presentan grandes variaciones a lo largo de la costa. La costa Cantábrica, recibe los mayores oleajes, generados en el Atlántico Norte, mientras que el Mediterráneo goza de un clima marítimo más suave, con oleajes más pequeños y menos desarrollados. La marea astronómica también es muy variable a lo largo del litoral, con carreras de marea de hasta 5 m en Santander y apenas unos cm en el Mediterráneo.

La riqueza natural de la costa española es inmensa, destacando los numerosos kilómetros de playa de nuestro litoral, los acantilados rocosos del Cantábrico, las praderas de *Posidonia* en el Mediterráneo o el Parque Nacional de Doñana, con gran biodiversidad y buena conservación.

Los recursos costeros son uno de los principales motores de la economía española. El turismo de sol y playa, el transporte marítimo y la pesca y acuicultura son algunas de las bases de nuestra economía.

La franja costera es una zona altamente dinámica y con una alta variabilidad natural. En la actualidad estamos empezando a sufrir las consecuencias del cambio climático y de una gestión de la costa en las últimas décadas que se caracteriza por una enorme presión por parte del sistema socioeconómico. Ante este hecho se presenta la evidente necesidad de conocer los posibles impactos y riesgos asociados al cambio climático con el objeto de poder afrontar, de forma planificada y con una base científico-técnica suficiente, la gestión del futuro de este preciado recurso.

La costa representa para España una franja de enorme valor y relevancia estratégica para su futuro, con un conjunto de singularidades geográficas, sociales y administrativas que se detallan a continuación.

2.1. Un litoral y varias vertientes

Dentro de las zonas costeras se consideran tres ámbitos posibles: el terrestre, el marítimo y el intermareal. A nivel general, y a modo de introducción, es necesario señalar que, en el plano de la organización jurídico administrativa, en España existen 10 Comunidades Autónomas con parte de su territorio ubicado en el litoral. Estas comunidades comprenden 25 provincias y 487 municipios costeros, y el límite del término municipal es el principal criterio cuando se trata de gestión integrada. A las 10 comunidades autónomas peninsulares (País Vasco, Cantabria, Asturias, Galicia,

Andalucía, Murcia, Valencia, Cataluña) hay que añadir los archipiélagos de Baleares y Canarias, y las ciudades de Ceuta y Melilla.

CCAA	Superficie terrestre (km ²)	Aguas interiores (km ²)	Longitud de costa (km)
País Vasco	7.261	396	256
Cantabria	5.289	304	283
Asturias	10.565	626	497
Galicia	29.434	2.483	1.720
Andalucía	87.268	2.164	917
Murcia	11.317	627	252
Valencia	23.305	1.823	474
Cataluña	31.930	1.227	597
Baleares	5.014	2.346	1.342
Canarias	7.273	2.399	1.545
ESPAÑA	504.781	2.399	7.883

Tabla 1. Algunas cifras sobre el litoral español. Fuente: Barragán 2004.

En lo que a la configuración de los sistemas naturales se refiere, los ambientes litorales constituyen áreas de transición entre los sistemas terrestres y los marinos. Son fronteras ecológicas (ecotonos) caracterizadas por intensos procesos de intercambio de materia y energía. Por su configuración se pueden diferenciar dos tipos de costa: de erosión (acantilados) y de sedimentación (playas, arenales y humedales costeros). La variedad y singularidad de los ecosistemas que confluyen en este ámbito abarcan valores paisajísticos, socioeconómicos y educativos muy importantes. Concretamente en el territorio español de la Península Ibérica, el relieve accidentado y su disposición periférica, así como la elevada altitud media, se manifiestan en una costa muy acantilada en ciertas regiones, destacando la costa Cantábrica, (una extensión total de 4.021 km de acantilados), aunque cabe destacar la existencia de aproximadamente 2.000 km de playa. El resto del litoral presenta características de costa baja (1.271 km), destacando la desembocadura del río Guadalquivir en Doñana y Delta del Ebro en Amposta, o ha sido transformado por obras artificiales (600 km), especialmente en el litoral Mediterráneo.

De los ecosistemas litorales más significativos del litoral español cabe destacar: los fondos marinos, que pueden ser rocosos o arenosos, como por ejemplo los fondos marinos del Parque Nacional Marítimo-Terrestre de las Islas Atlánticas; los acantilados, muy característicos de la costa Cantábrica o la costa Canaria; las playas, arenales y sistemas dunares, como las extensas playas y dunas del Golfo de Cádiz, y los humedales costeros, en los que se incluyen las rías, estuarios, deltas, marismas y albuferas, marjales, lagunas costeras y salinas, entre los que destacan las Rías Baixas, el Parque Nacional de Doñana, la Albufera de Valencia o el Delta del Ebro. Esta heterogeneidad de ecosistemas en España, se ve además acentuada por la existencia de diferencias notables entre su costa mediterránea y la atlántica.

2.1.1. La vertiente mediterránea

La zona mediterránea presenta un elevado porcentaje de playas. La condición de mar semicerrado influye de manera decisiva en sus características y se dan procesos de acumulación con frecuencia en la desembocadura de sus ríos. En el Mediterráneo, a diferencia del Atlántico, no se producen mareas de entidad, su rango mareal está entorno a 30 cm, y por consiguiente existe una ausencia de costa baja con grandes zonas de inundación por mareas.

El conjunto de sierras litorales existentes, muy próximas a la costa, caracteriza las zonas costeras catalanas. Las desembocaduras de sus principales ríos generan llanuras costeras amplias, que aunque no son predominantes, determinan el paisaje. De entre el gran número de cursos fluviales de esta área, destaca el Ebro. Su considerable caudal (líquido y antaño sólido), unido al régimen de mareas y corrientes, ha propiciado la formación de un gran delta. El delta del Ebro junto con la Costa Brava, recortada con playas encajadas en las calas, son las dos unidades ambientales más características de la costa catalana.

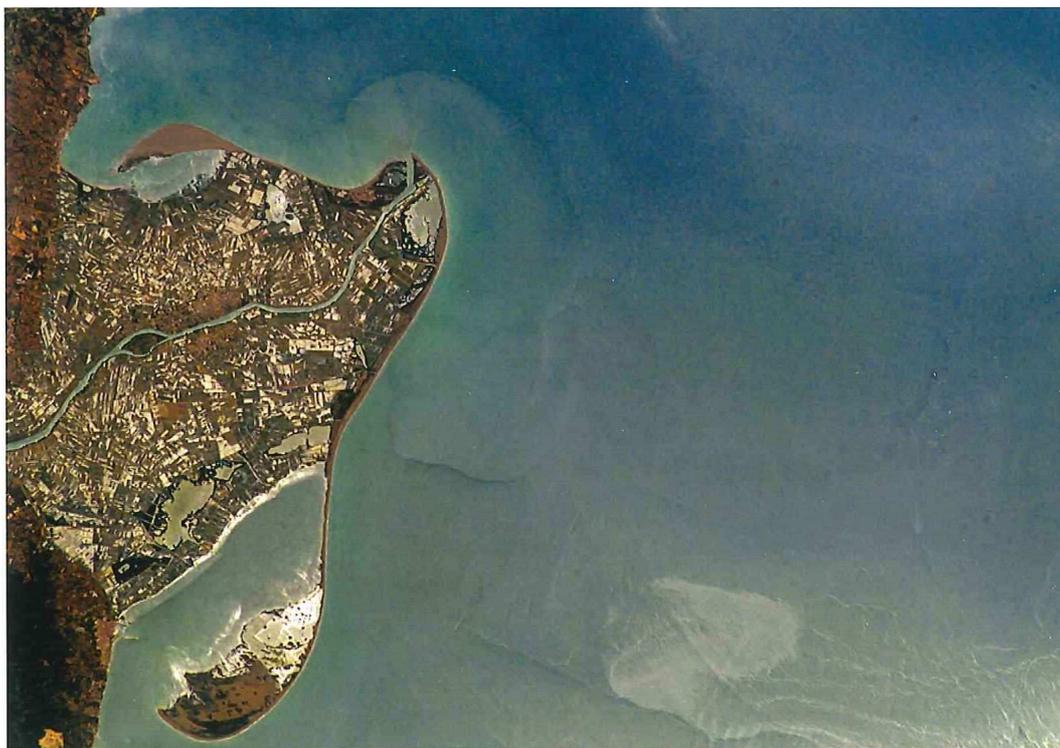


Figura 1. Foto aérea del Delta del Ebro. Fuente: Mares de España

La zona costera de Castellón y Valencia, entre Peñíscola y el Cabo de San Antonio, se encuentra en regresión debido a la disminución de los sedimentos de los ríos y a la

interrupción de la dinámica litoral por la construcción de infraestructuras portuarias. Esta franja costera linda con marjales y zonas húmedas de gran importancia.

En la costa de Murcia y Alicante, el efecto del viento sobre la arena ha dado origen a un conjunto de cordones dunares. En Murcia, destaca la formación costera de la Manga del Mar Menor que se caracteriza por tener una temperatura y salinidad mayor a la del mar exterior. En el norte de Alicante existe un paisaje litoral de calas y acantilados de gran belleza y un cierto grado de conservación de sus valores naturales.

Los enclaves de mayor valor ecológico de la costa mediterránea de Murcia, Valencia y Cataluña son: las zonas húmedas litorales, los cordones dunares, los macizos rocosos que dan origen a acantilados, las pequeñas islas e islotes y determinadas áreas de fondos marinos, donde destacan las praderas de *Posidonia oceanica*.

Las estribaciones de las Cordilleras Béticas, próximas a la costa, determinan unas llanuras costeras muy estrechas, a excepción de los valles de algunos ríos. El clima es templado cálido, con niveles de precipitación anual media que disminuyen acusadamente desde el estrecho de Gibraltar hasta la costa oriental de Almería, con precipitaciones muy escasas y variables. Los ríos son cortos con regímenes de marcada estacionalidad, algunos son corrientes efímeras, pero con una aportación de sedimentos de gran intensidad en las avenidas.

Este sector de la costa se caracteriza por una gran diversidad de espacios naturales, desde acantilados, hasta llanuras aluviales y deltas. Destaca el complejo volcánico de Cabo de Gata, con una gran riqueza vegetal asociada a un clima de características semiáridas, y el Mar de Alborán, con una notable diversidad biológica de especies tanto mediterráneas como atlánticas.

2.1.2. La vertiente atlántica

La zona está condicionada por la existencia de cadenas montañosas que llegan hasta el mar, sin apenas llanuras costeras, y por la gran energía de los temporales. El clima es templado, con borrascas que actúan a lo largo del año dando lugar a una humedad relativa alta y a unas temperaturas suaves. Los ríos son de corta longitud, fuerte pendiente y cuenca reducida. La costa es muy recortada, con abundancia de entrantes y salientes, con grandes acantilados.

La costa gallega se caracteriza por su alto nivel de complejidad y por la presencia destacada de las rías, antiguos valles fluviales ocupados por el mar. Las playas más importantes se encuentran dentro de las rías, a resguardo de los temporales, o rellenando profundos entrantes de los acantilados. Uno de los enclaves más significativos es el Parque Nacional de las Islas Atlánticas, en la provincia de Pontevedra.

La línea de costa cantábrica es rectilínea y alargada, con una fuerte pendiente al mar, abundantes acantilados, pocas playas y rías pequeñas. Los depósitos son generalmente de piedra y cascajos, y los sedimentos se sitúan dentro de las rías, en la desembocadura

de los ríos o en las ensenadas. El oleaje del sector noroeste determina el sentido neto del transporte litoral en dirección Este.

La franja litoral correspondiente a la costa suratlántica tiene principalmente tramos de costa baja y arenosa que se corresponden con las llanuras de las desembocaduras de los ríos Guadiana y Guadalquivir, en cuya desembocadura se encuentra el Parque Nacional de Doñana. El clima es templado-cálido mediterráneo oceánico, que se caracteriza con una acusada sequedad estival, temperaturas suaves en invierno, elevado número de horas del sol al año y periodos de sequía.

Destacan la acción de las corrientes marinas de la zona: la del Golfo de Cádiz y la del estrecho de Gibraltar, y la presencia de frecuentes vientos. Abundan las playas y los cordones dunares, que en algunas ocasiones presentan alturas considerables y, en otros casos, forman mantos eólicos móviles (como los sistemas dunares de Doñana, en Huelva, y de Valdevaqueros, en Cádiz). Otra característica destacable de este tramo de costa es la presencia de extensas marismas, generalmente sometidas a procesos de colmatación.

Entre los valores ambientales más sobresalientes de la zona, destacan los sistemas dunares y las marismas, que albergan una gran riqueza faunística, siendo el enclave más valioso el del mencionado Parque Nacional de Doñana.



Figura 2. Marismas del Guadalquivir. Fuente: Mares de España

2.1.3. Los archipiélagos

El archipiélago canario está formado por siete islas principales y algunos islotes. Su origen es volcánico y son el resultado de fenómenos eruptivos surgidos bajo el mar con una gran diferenciación geológica y topográfica, que se ha ido incrementando a lo largo del tiempo por procesos de erosión fluvial, marina y eólica.

El relieve de la mayoría de las islas es muy accidentado. El clima es subtropical cálido y oceánico, las temperaturas son templadas y la pluviometría escasa. Las islas más occidentales, especialmente el norte de las mismas, son más húmedas gracias a la influencia de los vientos alisios. La red hidrográfica se compone de corrientes intermitentes en barrancos, con fuerte pendiente y erosión. De manera general, en cada isla se distinguen la costa norte, formada por altos acantilados, y la costa sur, de carácter abierto y arenoso con una mayor cantidad de playas. Un rasgo característico de todo el archipiélago es la estrechez de la plataforma continental.

El archipiélago canario, por razones orográficas, geológicas y climáticas, presenta ecosistemas únicos en el continente europeo, enmarcados dentro de la Región biogeográfica terrestre Macaronésica, que forma parte de la región marina Mauritánica.



Figura 3. Isla de La Graciosa. Fuente: Mares de España

El archipiélago balear se corresponde con la prolongación de las Sierras Béticas. El clima es de tipo mediterráneo marítimo, con temperaturas invernales suaves y máximas estivales moderadas. En cuanto a la red hidrográfica, las cuencas son pequeñas y abundan los torrentes con corrientes efímeras.

Las islas Baleares poseen una gran longitud de costa en relación con su superficie, debido al carácter recortado de la misma. La plataforma continental es reducida, común para Mallorca, Menorca y Cabrera, y separada de Ibiza y Formentera.

Las características costeras varían entre islas. En Mallorca hay sectores de costa recortada con playas encajadas en calas, de costa accidentada, de playas y de espacios palustres. Menorca tiene una costa bastante homogénea, recortada con playas encajadas. Y en Ibiza la línea de costa es festoneada y acantilada, con escasas playas. En su conjunto, el archipiélago de las islas Baleares contiene una importante variedad de ambientes de alto valor ecológico. Cabe destacar: la Sierra Tramontana de Mallorca, gran parte de la costa menorquina y el Noroeste de Ibiza, por sus valores paisajísticos y faunísticos, humedales y sistemas dunares. Uno de los enclaves de mayor valor es el Parque Nacional del Archipiélago de Cabrera.

2.2. Dinámicas de la costa española

La costa española presenta una gran variabilidad de sus dinámicas marinas, tanto en el espacio como en el tiempo. Sólo hace falta observar las distintas vertientes descritas antes para ver los diferentes tipos de paisajes, costas, etc., que al final son el resultado de la interacción de las olas y mareas con la costa.

El oleaje es el resultado de la acción continuada del viento sobre la superficie del mar. La intensidad del viento y la longitud de la masa de agua sobre la que sopla configuran las peculiaridades de las olas que llegan a cada costa. Así por ejemplo, en el Golfo de Vizcaya la reducida extensión del golfo entre sus márgenes cantábrica y francesa no posibilita la existencia de grandes olas del noreste en las costas cantábricas. Sin embargo, las dimensiones del océano Atlántico entre el Cantábrico y Terranova sumadas a la dirección de los vientos dominantes del noroeste generados por las borrascas noratlánticas dan lugar a los oleajes de gran intensidad que azotan las costas de Galicia y el Cantábrico. Por tanto, la dirección de los oleajes dominantes en el Cantábrico está comprendida entre los sectores noroeste y nornoroeste y se caracterizan por elevadas alturas de ola y grandes períodos, es decir, oleajes muy energéticos en comparación con las olas del Mediterráneo. La altura de ola media en la costa Cantábrica está en torno a 1,5-2 m (olas más grandes en la costa de Galicia) con períodos de pico medios en torno a 10 segundos. Sin embargo, también observamos una clara estacionalidad, con oleajes más energéticos y vientos provenientes del tercer y cuarto cuadrante en invierno mientras que en verano rolan al cuarto y primer cuadrante bajando la intensidad.

Otra dinámica importante del Golfo de Vizcaya son las mareas, principal mecanismo modelador de los estuarios de esta zona. El continuo flujo y reflujo de las mareas en el interior de los estuarios genera corrientes rápidas en las desembocaduras de todos los estuarios e involucra grandes cantidades de agua con caudales muy superiores a los caudales fluviales. La marea astronómica (el movimiento del agua generado por la atracción gravitatoria del sistema tierra-luna-sol) del Golfo de Vizcaya es semidiurna, es decir, tiene un período de 12 horas y al día ocurren dos bajamares y dos pleamares y su

amplitud (carrera de marea) varía entre los 4 y los 5 m que se alcanzan en Santander. De forma semejante a la marea astronómica se producen cambios en el nivel del mar debido a la marea meteorológica que se explica como un aumento del nivel de agua en puntos de la costa debido a la acción del descenso de la presión atmosférica durante el paso de una borrasca unido al efecto del viento sobre la superficie del mar. Las medidas registradas a lo largo del litoral cantábrico muestran que la marea meteorológica alcanza valores de hasta 50 cm.

Un caso peculiar de las mareas lo encontramos en el Estrecho de Gibraltar, que concilia la oscilación de la marea del océano Atlántico, donde la carrera de marea excede los 3 m en mareas vivas, con la del Mediterráneo, donde es prácticamente inexistente. En el Golfo de Cádiz el patrón de marea se ciñe al del Atlántico Norte, con mareas semidiurnas y valores del rango que van cambiando desde Huelva hasta Tarifa. En la zona del Estrecho y Mar de Alborán la oscilación pasa de una amplitud de 0,3 m en el límite Mediterráneo disminuyendo hasta ser nula en Alicante. Entre bajamar y pleamar, la corriente de marea se dirige hacia el Atlántico llevando el agua necesaria para ajustar el nivel a la pleamar oceánica; de pleamar a bajamar lo hace hacia el Mediterráneo, evacuando agua para ajustarse a la bajamar. Por otro lado, las diferentes masas de agua entrante y saliente por el Estrecho suponen una compleja estructura espacial de la columna de agua y corrientes en esta zona.

El oleaje del Golfo de Cádiz está fuertemente gobernado por la configuración del Estrecho de Gibraltar y la protección que proporciona el Cabo de San Vicente frente a los oleajes energéticos del noroeste. En invierno los oleajes dominantes y más energéticos provienen del noroeste (borrascas noratlánticas), mientras que en verano los vientos de levante generan oleajes de corto período que llegan a las costas de Huelva con dirección sureste.

Las características de las dinámicas marinas en el Mediterráneo español son totalmente diferentes a las de la cuenca Atlántica. Debido al tamaño del mar Mediterráneo y la configuración del litoral, los oleajes que llegan a las costas españolas están poco desarrollados y se caracterizan por tener períodos bajos (6-8 segundos) y alturas de ola media pequeñas (en torno a 0,5 m). La zona más energética se presenta en la costa Brava, en Girona, y al norte de las islas de Menorca y Mallorca, que en invierno sufren los temporales del noreste asociados a vientos fuertes del Mistral. En cuanto a la marea, al ser un mar semiconfinado la marea astronómica es muy pequeña, puesto que es poca la masa de agua que penetra a través del Estrecho de Gibraltar cada 12 horas. Sin embargo, la marea meteorológica, asociada a eventos de bajas presiones y fuertes vientos toma un carácter importante, llegando a acumularse hasta 1 m de agua en la costa.

Por último, las Islas Canarias, situadas en la región macaronésica tienen unas características del oleaje condicionadas por su situación: la proximidad del continente africano y el apantallamiento que ejercen unas islas sobre otras. Los oleajes dominantes proceden del noroeste en invierno, generados por las tormentas extratropicales del Atlántico Norte, con largos períodos y elevada altura de ola (entre 2 y 4 m), y del noreste, que se corresponden con oleajes en generación (poca altura de ola y corto

período) debidos a la acción de los vientos alisios característicos de la primavera y el verano. Ocasionalmente también pueden llegar oleajes del suroeste de largo período generados por ciclones tropicales lejanos en la estación de otoño. En cuanto a la marea en las islas es también semidiurna y su valor medio está en torno a 1 m y con valores máximos de 2,5 y 3 m pero no hay que perder de vista la sobreelevación generada por los fenómenos meteorológicos, que puede llegar a ser del mismo orden de magnitud que la marea astronómica.

2.3. Los sistemas naturales de la costa española

El litoral español es un organismo vivo que está en permanente proceso de remodelación por la acción del oleaje, las mareas, las avenidas de los ríos, el viento... el resultado es un paisaje de gran belleza que alberga distintos ecosistemas de transición, siendo las playas, los estuarios y las plataformas intermareales rocosas los más representativos de nuestras costas.

Desgraciadamente, en los últimos cincuenta años la transformación de las costas españolas ha sido tan extensiva que los espacios naturales o vírgenes escasean en nuestro patrimonio litoral. Sin embargo, la riqueza de nuestro litoral ha permitido que todavía queden ecosistemas, hábitats y una gran biodiversidad que hacen de nuestras costas un paraje espectacular.

Las playas son los ecosistemas más frecuentados debido a su uso recreativo, sin embargo, desde un punto de vista ecológico la dinámica propia de estos ambientes sedimentarios determina que, en términos generales, sean ecosistemas más pobres y poco diversos, poblados principalmente por invertebrados enterrados en la arena que sirven como alimento a cangrejos, insectos y aves costeras. Las playas ocupan un 24% de la costa española y suponen alrededor de 1.900 km. A lo largo del litoral español encontramos distintos tipos y características. Por ejemplo, en el norte cabe destacar las playas encajadas. Resalta la playa urbana de La Concha en San Sebastián, por su gran belleza, pero también merecen una mención especial las playas del entorno de Llanes, donde podemos encontrar la playa de Gulpiyuri, una pequeña playa situada tierra adentro y formada por el hundimiento de una dolina de tipo cárstico. Otra playa que destaca por su gran belleza es la playa de Las Catedrales en la costa de Lugo. Las playas de las Islas Cíes son de arenas blancas y finas, y su existencia es debida al abrigo que le proporcionan los farallones, que las protegen de las grandes olas generadas en el Atlántico Norte. En el Golfo de Cádiz, las playas de la Barrosa y Cabo Roche son de arena media dorada procedente de las torrenteras y la erosión de los acantilados, y también podemos destacar las largas playas de El Palmar y Zahara de los Atunes que se extienden hacia el Estrecho de Gibraltar donde encontramos las dunas de Valdevaqueros cerca de Tarifa. En el oeste andaluz las playas albergan una comunidad faunística moderadamente rica, entre las que se encuentran importantes recursos marisqueros como las coquinas, almejas, berberechos o navajas. El litoral mediterráneo también cuenta con un gran número de kilómetros de playa, pero desgraciadamente, la mayoría de ellos han sufrido la presión urbanística desmesurada de los últimos años. Esto da

lugar a playas atrapadas entre el desarrollo urbanístico del lado de tierra y los impactos de cambio climático del lado del mar. Las playas que no se encuentran constreñidas de esta manera pueden cambiar su forma y extensión de manera natural en respuesta a cambios en los temporales, oleajes o corrientes. Sin embargo, las modificaciones hechas por el hombre en la franja costera limitan fuertemente la respuesta natural de las playas ante el cambio climático (Defeo y McLachlan 2005). Afortunadamente quedan reductos como la playa de Los Genoveses, en la costa de Almería, que se encuentra en el Parque Natural de Cabo de Gata, uno de los pocos lugares de la costa española mediterránea libre de la presión urbanística.



Figura 4. Playa de los Genoveses. Fuente: Mares de España

Los sistemas dunares han sufrido, desgraciadamente, una gran regresión en el último siglo. Estos sistemas presentan una colonización por especies únicas capaces de sobrevivir en un ambiente extremadamente seco y salino y en un terreno inestable. A lo largo del litoral español, hoy en día, encontramos pequeños reductos de cordones dunares debido a la fuerte presión urbanística desarrollada, en muchos casos, sobre estos sistemas sedimentarios. La desaparición de las dunas es consecuencia, por una parte, de la disminución de los aportes sedimentarios y, por otra, de la desestabilización que genera la urbanización litoral. Sin embargo destacan los complejos dunares del Parque Nacional de Doñana, que forman el mayor sistema de dunas móviles de Europa, las ya mencionadas dunas de Valdevaqueros o las dunas de Maspalomas, al sur de la Isla de Gran Canaria. En las dunas compiten la flora y la fauna terrestres que soportan altos niveles de salinidad. La biodiversidad de estos ecosistemas es inmensa: correlinos,

gaviotas, aves zancudas... en cuanto a la flora, encontramos una clara graduación en la vegetación, desde el barrón característico de las dunas primarias hasta especies como el pino marítimo, fijado en las dunas terciarias.



Figura 5. Dunas de Maspalomas. Fuente: Mares de España

Por el contrario, la zona intermareal de los sustratos rocosos que bordean el litoral, aunque es una franja muy estrecha, comparada con la amplitud de otros espacios litorales, presenta una gran riqueza y muy elevada diversidad de especies, además de albergar recursos marisqueros de alto valor económico, como los percebes. Este tipo de hábitats es característico del litoral cantábrico y la costa gallega.

Otro ecosistema característico de nuestras costas y de gran belleza son los acantilados rocosos. Se localizan principalmente en el litoral cantábrico, Galicia, islas Canarias y Baleares, Granada, Almería, Murcia, Alicante y Girona. Los acantilados más altos de Europa se encuentran en la costa gallega, en Herbeira, también destacan los de Cabo Ortegal, donde confluyen las aguas atlánticas y cantábricas, o los de Estaca de Bares, que separan las rías de Ortigueira y del Barquero. En Andalucía Occidental destacan los acantilados de Roche, al norte de Conil de la Frontera, formados por arcillas y arenas de colores ocres, anaranjados y rojizos. Entre Almuñecar y Nerja se encuentran los acantilados de Cerro Gordo, paisaje formado por el encuentro de la Sierra Almijara con el Mar de Alborán. El acantilado se eleva bruscamente alcanzando unos 80 m de altura, alternando con pequeñas playas y diminutas calas formadas por la acción del oleaje y por los deslizamientos de las laderas. Ya en el Mediterráneo, la Serra Gelada se alza sobre las planas de Benidorm, l'Alfàs del Pi y Altea y, en su frente litoral, forma una línea de acantilados de más de 300 m de altura. En el oeste de Tenerife son famosos Los Gigantes, unos enormes acantilados basálticos que miden hasta 800 m de altura.

Los humedales costeros son uno de los paisajes más interesantes del litoral español: marismas formadas en los estuarios de los ríos, salinas, lagunas litorales, deltas, albuferas... Además representan uno de los hábitats más valiosos del planeta debido a su importancia como núcleos generadores de vida en el medio marino. Se trata de unidades ambientales que concentran la mayor capacidad de producción de biomasa del planeta, llegando a superar hasta en 10 veces a la de los bosques tropicales. Esa abundancia de alimento atrae a numerosas aves migratorias y permite el desarrollo de una gran diversidad de especies animales y vegetales, siendo algunas de ellas exclusivas de determinadas zonas del litoral español. Sin embargo, los valores ambientales de los humedales contrastan con su extremada fragilidad, ya que son sistemas particularmente sensibles a los usos humanos inadecuados o excesivos. En los estuarios se desarrolla una importante comunidad de invertebrados bentónicos responsable, en gran parte, de la riqueza y abundancia de organismos que los caracteriza. También tienen mucha importancia las comunidades vegetales, cuya distribución responde, en buena medida, a los gradientes mareales existentes en estas zonas. Así, en las zonas permanentemente sumergidas o en la intermareal media e inferior, el sustrato es colonizado por praderas de fanerógamas marinas que proporcionan numerosos microhábitats que son utilizados por la fauna como zonas de refugio frente a depredadores o como zonas de puesta. Además, los humedales tienen especial trascendencia para la avifauna, que los utiliza como zona de refugio, descanso y alimentación y constituyen áreas de paso para numerosas especies migratorias, muchas de las cuales están recogidas en alguna figura de protección a nivel europeo. En el norte encontramos las marismas de Urdaibai en Vizcaya y las marismas de Santoña en Cantabria como importantes lugares de invernada para especies migratorias que se reproducen en otras latitudes. Como una zona de transición particular del litoral encontramos las rías gallegas. Las condiciones hidrográficas y la fauna y flora asociadas son eminentemente marinas, por lo que sólo la parte más interna de las rías se puede considerar estuario como tal. En el Golfo de Cádiz encontramos algunos de los estuarios más importantes de España, fundamentalmente asociados a las desembocaduras de los ríos Guadiana, Piedras, Tinto y Odiel (ría de Huelva), Guadalquivir (en las marismas de Doñana) y Guadalete (en la bahía de Cádiz), todos ellos de especial relevancia para la avifauna. Desde el punto de vista ecológico son de gran interés para la avifauna y la gran biodiversidad que albergan sus aguas.

En los estuarios mediterráneos la influencia mareal es escasa, lo que, unido al mayor caudal que aportan algunos ríos determina la formación de deltas, siendo su mejor representante el delta del Ebro. Desde el punto de vista ecológico, el litoral mediterráneo sobresale por sus marjales, albuferas y saladares. Estas zonas húmedas suelen ser muy someras y presentan un rango de salinidad muy variable en función del régimen de precipitaciones, de la evaporación y la influencia de las mareas. La Manga del Mar Menor representa una de las pocas lagunas litorales que quedan. En este caso es una laguna hipersalinizada separada del Mar Mediterráneo por un cordón dunar altamente urbanizado y degradado. Y mención especial recibe el Delta del Ebro, uno de los deltas más importantes del Mar Mediterráneo. El río Ebro recoge y conduce las aguas que dejan las borrascas noratlánticas en su viaje desde el Golfo de Vizcaya hasta su encuentro con el Mar Mediterráneo. En su desembocadura el río se convierte en un chorro de descarga soltando primero los materiales más gruesos y posteriormente los finos. Los sedimentos depositados en el frente deltaico afectaron al oleaje, cambiando su dirección de

propagación y provocando su rotura y generando corrientes que, junto con el viento, redistribuyeron el sedimento formando los largos condones litorales del Trabucador y el Fangar. Desde que el delta se inició en Amposta, El Ebro ha tenido numerosas bocas, pero fue en el pasado siglo cuando definitivamente el río orientó su desembocadura al este. En los últimos años el río ha sido regulado por múltiples presas que han dado lugar a la disminución del caudal sólido del río y, por lo tanto, al retroceso del delta. Sin embargo, la introducción del cultivo de arroz, las prácticas de laboreo e inundación temporal, la utilización de herbicidas, plaguicidas y fertilizantes y el abandono de algunas salinas también han alterado sustancialmente el delta.

Mas abajo, sumergida entre roquedales y arena, se afirma la vegetación de algas laminarias de diferentes colores y texturas, que las olas arrancan y transportan hasta la playa. A una profundidad de entre cinco y quince metros vive la *Posidonia oceanica*, especie milenaria de lento crecimiento, característica de las aguas Mediterráneas (Jordà et al. 2012b).

La *Posidonia oceanica* es uno de los ecosistemas más sensibles y emblemáticos en el Mediterráneo constituyendo un gran tesoro natural. La *P. oceanica* es una especie endémica de esta zona, de gran valor ecológico que constituye el entorno más singular y de mayor diversidad de este litoral, siendo la base de un ecosistema clave en esta región. A lo largo de todo el Mediterráneo las praderas de *Posidonia* ocupan en torno a 50.000 Km², concentrándose en las Islas Baleares bosques de 2.000 km² (el 90% del que ocupa en todo el Mediterráneo español) en fondos de entre 1 y 45 m de profundidad. Estas praderas están protegidas por la Directiva Hábitat de la Unión Europea y por la legislación española que las declara en Régimen de Protección Especial. Otras figuras como el Parque Nacional del Archipiélago de Cabrera o la declaración de Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO de la pradera de la playa de S'Espalmador en Formentera tratan de proteger esta planta que forma uno de los ecosistemas más productivos e importantes para el mantenimiento de la biodiversidad. Además, los bosques de *Posidonia* proporcionan importantes servicios naturales: son importantes sumideros de CO₂, superando en 10 veces la capacidad de sumidero del bosque amazónico virgen, acumulan depósitos de carbono de varios metros de espesor reteniendo sedimentos, disipando la energía del oleaje y alimentando las playas con carbonatos, protegiendo así las costas frente a la erosión y manteniendo la transparencia de las aguas y sirven como hábitat a especies también protegidas y amenazadas (Jordà et al. 2012b).

La *P. oceanica* es además, muy probablemente, la especie más longeva de la biosfera. Es en Formentera donde se encontró un clon de esta planta que podría superar los 100.000 años de edad (Arnaud-Haound et al. 2012). Su crecimiento es muy lento, basado en el crecimiento clonal, que comparte con otras plantas marinas. Sus tallos crecen 1 cm al año (llegan a vivir más de 50 años) y ocupan lentamente el espacio produciendo millones de plantas a partir de un mismo clon (tardan entre 200 y 600 años en ocupar una hectárea de fondo marino). Sus hojas viven en torno a 1 año y pueden alcanzar un metro de longitud. La especie se caracteriza porque se puede adaptar a la variación local de los recursos ajustando su modo de crecimiento: en regiones pobres el crecimiento será más lento, con mayores raíces y mayor longitud de las hojas. Como consecuencia de ello la *P.*

oceanica es una especie muy vulnerable a pequeños aumentos en su tasa de mortalidad, lo que da lugar a una pérdida de plantas muy rápida y a la regresión de las praderas.

2.4. El sistema socioeconómico en la costa española

España es un país costero por excelencia que cuenta con más de 10.000 km de costa, una relevante posición estratégica, singulares características oceanográficas, paisajes de gran belleza y riqueza biológica sin igual. Todos estos factores han hecho que el desarrollo socioeconómico de España siempre haya estado íntimamente ligado al mar y sus costas. Tradicionalmente los principales usos vinculados al mar han sido la pesca y el transporte marítimo, pero junto a ellos, cada vez son más los usos y actividades que se desarrollan en el mar y la costa, como la acuicultura, el turismo, el aprovechamiento energético de olas, viento y mareas, desalinización de agua... (Actividades Humanas en los Mares de España 2008).

La tradición pesquera en nuestro país es bien conocida. La economía de muchas poblaciones costeras españolas ha dependido en el pasado, y sigue dependiendo hoy en día de esta actividad. Un caso claro son las numerosas localidades gallegas que viven de la pesca y el marisqueo, poblaciones en el Cantábrico como Bermeo en Vizcaya o Santoña en Cantabria, o por ejemplo pueblos como Barbate, en el sur de Cádiz, que viven de la pesca del atún de almadraba. En la actualidad España se encuentra a la cabeza de la Unión Europea en tonelaje de flota, volumen y valor de la pesca desembarcada, número de pescadores y producción acuícola. Además de la pesca, también suponen una materia prima muy valiosa las algas, con las que se puede elaborar papel, alcohol, levadura, cosméticos y otros productos como el agar. En la costa cantábrica es tradicional la recogida de la caloca (nombre dado a algas del género *Gelidium*) en los primeros meses de otoño, tras los temporales que arrancan las algas del fondo y las depositan en las playas, para la fabricación de gelatinas y agentes gelificantes.

El atractivo que han ido ganando a lo largo de los años las zonas costeras ha supuesto una importante migración hacia el litoral. A principios del siglo XX sólo se utilizaba el 12% del suelo litoral español, en 1950 la ocupación había llegado al 20%; en 1988 esta cifra ascendió al 55% con nuevas ciudades, instalaciones agrícolas e industriales y ya en 2006, más del 75% de la costa estaba urbanizada (Losada 2010). Gran culpa de esta desmesurada urbanización la ha tenido el modelo socioeconómico desarrollado en el turismo de sol y playa. Según la UE, dentro del sector turístico, el costero es el más importante en términos de flujos y generación de renta. Las zonas costeras son las preferidas y la región Mediterránea es el principal destino del mundo, representando un tercio de los ingresos totales del turismo (Actividades Humanas en los Mares de España, 2008). Sin embargo, el sector turístico depende de manera significativa de la buena conservación de las costas y las aguas, y los procesos de urbanización y el desarrollo de las actividades turísticas configuran un conjunto de presiones sobre el medio, que se concentra especialmente en el Mediterráneo, donde en la actualidad, una tercera parte de la costa mediterránea española tiene totalmente edificado su primer kilómetro de mar

a tierra. Ejemplos claros son localidades de la Costa Blanca como Benidorm, Torrevieja o Marina D´Or en Alicante, o Torremolinos, Málaga o Marbella en la Costa del Sol. Además del turismo de sol y playa, hay otras actividades ligadas a este sector como son los deportes náuticos: navegación deportiva, submarinismo, windsurf, kitesurf o surf, actualmente en pleno auge. Algunas pequeñas localidades de la costa española han desarrollado sus economías alrededor de estos deportes, como Tarifa, en Cádiz, que vive del windsurf y kitesurf, o Mundaka en Vizcaya, mundialmente conocida por los amantes del surf por la ola de su ría. Además, la navegación deportiva es la actividad que ha dado lugar también a un amplio desarrollo de nuevos puertos deportivos a lo largo de todo el litoral español.

Otro de los motores económicos del país tiene que ver con la actividad portuaria. Los principales puertos de interés general en España dan entrada y salida a la mayor parte de las exportaciones (cerca del 60%) e importaciones (85%) de mercancías (Puertos del Estado). Además, la situación geográfica de España, próxima al eje de una de las rutas marítimas más importantes del mundo, la beneficia de un mayor afianzamiento como área estratégica en el transporte marítimo internacional y como plataforma logística del sur de Europa. La situación geográfica del puerto de Algeciras, a las puertas del Mar Mediterráneo, lo convierte principalmente en un puerto *hub* de intercambio de contenedores, siendo el puerto español que más mercancía mueve. En el Mediterráneo los puertos de Valencia y Barcelona son los que mayor volumen de mercancías mueven, mientras que en el Cantábrico destacan los puertos de Bilbao, Gijón y Ferrol. Los puertos de Las Palmas y Tenerife también son puertos comerciales que destacan por su alto volumen de mercancías.

Por otra parte, otro campo que se viene desarrollando en los últimos años es el aprovechamiento de la energía generada en mares y océanos. Las energías renovables que se pueden aprovechar del mar son fundamentalmente la maremotriz (energía de las mareas), undimotriz (energía de las olas) y la eólica marina, mediante parques eólicos offshore. El aprovechamiento de estas energías todavía se encuentra en un estado bastante inicial en España, donde principalmente se están llevando a cabo estudios científicos, pruebas mediante plantas piloto o prototipos y regulaciones del sector (en 2007 se comenzó a regular normativamente el sector de la energía eólica marina). Pero además, España cuenta con la primera planta maremotriz comercial de Europa, situada en Motrico (Guipúzcoa), e inaugurada en Julio de 2011. Esta no es la situación en gran parte de Europa donde la energía eólica offshore se encuentra en un estado de implantación muy avanzado.

2.5. La costa española y el cambio climático

España es pues un país eminentemente costero, que goza de un litoral de gran extensión y riqueza, con numerosos ecosistemas y espectaculares paisajes. Además, la economía española depende en gran medida de la costa y sus mares, ya que en ellos se llevan a cabo numerosas actividades, desde muy tradicionales como la pesca, hasta otras como el turismo masivo de sol y playa o el transporte marítimo. El modelo de desarrollo

económico implantado en los últimos años y la explotación extensiva de los recursos supone una amenaza para el litoral, que ha incrementado su exposición y vulnerabilidad en muchas zonas debido a la presión urbanística y la degradación sufrida. A estas presiones de tipo humano hay que añadir la amenaza del cambio climático, directamente asociada con la subida del nivel del mar, pero también, como se describe a continuación, con otros factores de cambio.

El pasado nos ha enseñado que la franja costera y la línea de costa son altamente dinámicas y que presentan una variabilidad natural. Entender esa variabilidad nos puede ayudar a interpretar y hacer un pronóstico de cómo podría cambiar la costa en el futuro, por ejemplo, como resultado de la subida del nivel del mar. Sin embargo, la urbanización desmesurada de los últimos años ha modificado la línea de costa, construyendo edificios y carreteras sobre dunas y cordones litorales, desecando marismas y lagunas costeras y rigidizando el litoral mediante diques y espigones. Todas estas actuaciones se hicieron suponiendo que la línea de costa permanecería estable, que los eventos extremos de inundación estarían dentro del rango histórico definido y que el nivel del mar no cambiaría. Sin embargo, como se muestra en el capítulo siguiente, estas previsiones no se mantendrán en el futuro.

El calentamiento global y la presión ejercida por el hombre están alterando y creando cambios y desequilibrios en la costa que conocemos. Entender estos cambios y planificarse para afrontarlos son cuestiones de gran importancia y urgencia para España, su sociedad y sus valores naturales costeros.

En el análisis del cambio climático en la costa que se ha realizado en este proyecto, se ha seguido el marco conceptual que se ilustra en la Figura 6 y que es el seguido por el IPCC en sus informes AR4 y, especialmente el AR5. Las consecuencias derivadas del cambio climático se plantean en términos de riesgos. Para ello, se asume que la costa se puede dividir en dos subsistemas, los sistemas humanos o socioeconómicos y los sistemas naturales. Aunque las interacciones entre ellos son complejas y no lineales, esta división permite identificar más fácilmente los diferentes agentes susceptibles de generar riesgos así como sus elementos característicos, pues éstos contribuyen a la determinación de la exposición y vulnerabilidad frente al cambio climático. Los sistemas naturales considerados incluyen las costas rocosas, playas, humedales, praderas de laminarias, corales, acuíferos, estuarios, marismas, deltas, etc.

Dentro de los sistemas socioeconómicos se considera la población vinculada a los asentamientos urbanos, las infraestructuras o sectores de actividad económica como la agricultura, pesca, el turismo o aspectos vinculados a la salud.

En este análisis, el riesgo se asocia a aquellos factores de origen climático o no, susceptibles de cambiar y producir riesgos/consecuencias en los sistemas costeros. Para muchos de estos factores, los cambios son inducidos por la propia variabilidad natural del clima, mientras que otros son inducidos por el cambio climático de origen antropogénico.

Entre las opciones para reducir los riesgos asociados al cambio climático las estrategias de mitigación actúan directamente sobre el clima pero también sobre algunos de los factores antropogénicos. Sin embargo, la adaptación actúa sobre los factores de cambio

pero también modificando la exposición o la vulnerabilidad, lo que modifica el riesgo. La Figura 6 muestra un esquema conceptual de los aspectos enunciados.

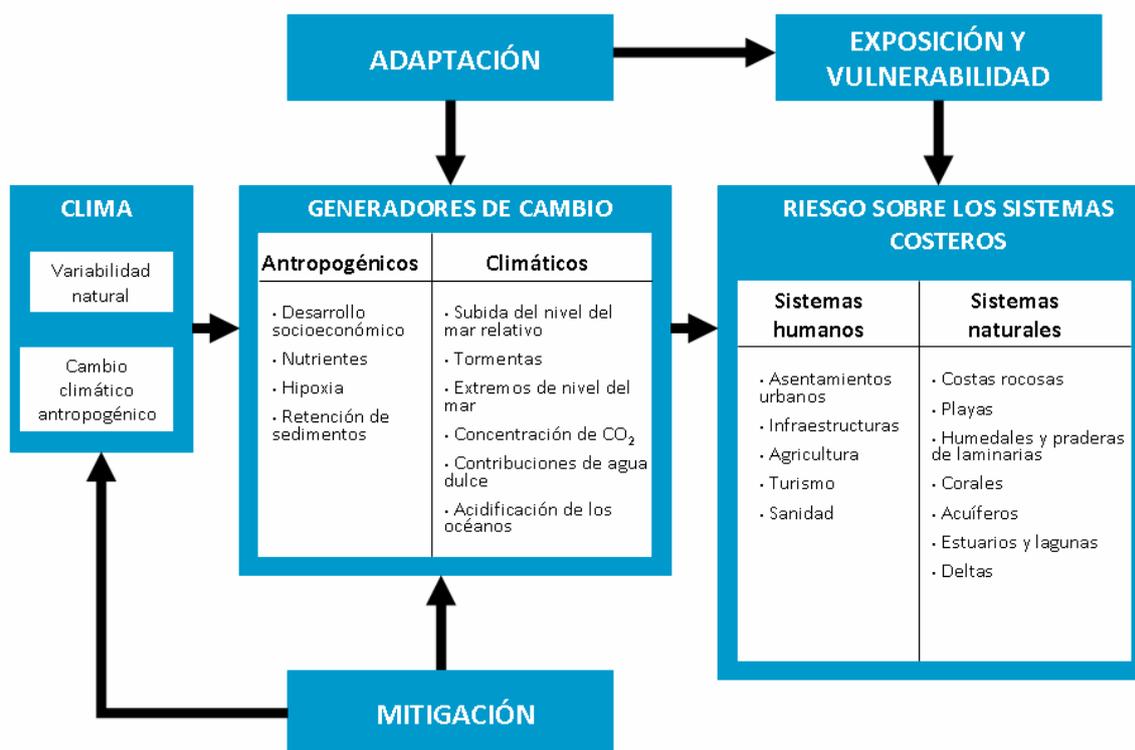


Figura 6. Esquema conceptual de cómo el cambio climático afecta al sistema costero generando consecuencias sobre los sistemas humanos y naturales. Fuente: Modificada de AR5, IPCC 2013.

3. FACTORES DE CAMBIO

Estudios recientes muestran que los cambios observados en el sistema climático están siendo más rápidos de lo esperado. La tasa de aumento del nivel medio del mar observado ha variado entre 1,5 y 1,9 mm/año entre 1900 y 2010 y entre 2,8 y 3,6 mm/año entre 1993 y 2010 (IPCC-AR5).

El aumento del nivel del mar no es igual a lo largo de todas las costas del mundo. En España se han llevado a cabo numerosos estudios sobre el aumento en el nivel del mar en la costa española, obteniéndose tasas de aumento de entre 1-3 mm/año. Los extremos de nivel del mar se han estudiado a través de la sobreelevación originada por el viento y la presión atmosférica, obteniéndose una disminución generalizada de estos eventos.

El oleaje es una de las principales dinámicas susceptibles de cambio que afectan a nuestra costa. En los últimos años se han observado aumentos en la intensidad del oleaje en el Cantábrico y disminución en el Mediterráneo y Canarias. El comportamiento encontrado es similar en alta mar y en aguas costeras, aunque los efectos de propagación sobre el oleaje hacen que los cambios sean más suaves en el litoral.

Otros factores como la acidificación de los océanos, la temperatura del agua del mar o la aportación de caudales de agua dulce han experimentado cambios en los últimos años. En el caso de las contribuciones de agua dulce, el cambio en los usos del suelo ha sido un factor decisivo en los cambios experimentados.

Factores no climáticos como la hipoxia, desvío de caudales, retención de sedimentos o pérdida de hábitat, la mayoría de origen antropogénico, potencian los impactos de cambio climático en la costa.

La subsidencia natural de las llanuras costeras (especialmente de los deltas) potencia la subida del nivel del mar, al disminuir la cota del terreno. Además acciones antropogénicas como la extracción de recursos del subsuelo o la urbanización masiva contribuyen a aumentar la tasa de subsidencia. En España las zonas con mayor subsidencia son el Delta del Ebro y la desembocadura del Guadalquivir.

En los últimos años se ha producido un aumento demográfico muy elevado en la franja costera. El ritmo de crecimiento anual de la población residente en municipios costeros fue de un 1,9 %, siendo superior en la fachada mediterránea, especialmente en Tarragona, Girona, Alicante y Castellón.

En los últimos años se han producido notables cambios en los usos del suelo, produciéndose un crecimiento urbanístico descontrolado en la costa que ha dado lugar a la rigidización de gran parte del litoral.

3.1. Introducción

Entre los factores de cambio de origen climático se encuentran: cambios en el nivel del mar relativo, cambios en la temperatura del océano en superficie, cambios en las tormentas/temporales (oleaje, viento), en los extremos de nivel del mar, en la concentración de CO₂ en el océano y en las contribuciones de agua dulce al mar o la acidificación del océano. La Tabla 2 resume los principales efectos físicos y químicos de los factores de cambio climático a nivel global para los sistemas costeros, sus tendencias observadas desde el AR4 y las proyecciones incluidas en el AR5.

Factores climáticos	Efecto	Tendencias	Proyecciones
Nivel del mar	Sumergencia, daños por inundación, erosión costera; intrusión salina; cambios en el nivel freático; cambio y pérdida de humedales	Aumento muy probable (>90%) del nivel medio del mar global (5.3.2.2. AR5 WG1 Capítulos 3.7.2, 3.7.3)	Aumento muy probable (>90%) del nivel medio del mar global. Variabilidad regional
Tormentas (ciclones tropicales/extratropicales)	Marea meteorológica y oleaje; inundación costera, erosión; intrusión salina; cambios en el nivel freático; cambio y pérdida de humedales; daño en infraestructuras localizadas en la costa y en obras de protección	Ciclones tropicales: grado de confianza bajo (en torno a 2 sobre 10) en las tendencias observadas en la frecuencia y la intensidad debido a las limitaciones en las observaciones y la variabilidad regional (Box 5.1, WG1 2.6.3). Tormentas extratropicales: cambios probables (>66%) en la trayectoria de las borrascas, pero grado de confianza bajo en los cambios observados en la intensidad (5.3.3.1 AR5 WG1 2.6.4).	Ciclones tropicales: entre incremento probable (>66%) y ausencia de cambio en la frecuencia, incremento probable (>66%) en los ciclones tropicales más intensos. Tormentas extratropicales: alto grado de confianza (en torno a 8 sobre 10) de que la reducción de tormentas extratropicales será pequeño a nivel mundial. Grado de confianza bajo (en torno a 2 sobre 10) en lo referido a cambios en la intensidad.

Factores climáticos	Efecto	Tendencias	Proyecciones
Viento	Oleaje de viento, marea meteorológica, daños a infraestructuras situadas en la costa; cambios en el transporte eólico dunar	Grado de confianza bajo (en torno a 2 sobre 10) en las tendencias observadas en la velocidad media y extremal de los vientos (5.3.3.2, SREX, WG1 Capítulo 3.4.5).	Grado de confianza bajo (en tono a 2 sobre 10) en las proyecciones de velocidades medias del viento. Incremento probable (>66%) en la velocidad de los vientos extremos de ciclones tropicales.
Olas	Erosión costera, cambios en la operatividad y estabilidad de infraestructuras costeras; daño de infraestructuras situadas en la costa; inundación costera	Aumento (tendencia positiva) probable (>66%) en la altura de ola significativa en latitudes altas (5.3.3.2, WG1, Capítulo 3.4.5).	Grado de confianza bajo (en torno a 2 sobre 10) para las proyecciones en general pero grado de confianza medio (en torno a 5 sobre 10) para los incrementos en la altura de ola significativa del Océano Antártico.
Niveles del mar extremos	Inundación y erosión costera; intrusión salina	Grado de confianza alto (en torno a 8 sobre 10) de aumento de niveles del mar extremos debido al aumento del nivel medio del mar global (5.3.3.3, WG1 Capítulo 13).	Incremento con grado de confianza alto (en torno a 8 sobre 10) debido al aumento del nivel medio del mar global. Los cambios debidos a los cambios en las tormentas tienen un grado de confianza bajo (en torno a 2 sobre 10).
Temperatura del mar en superficie	Cambio en la estratificación y circulación; aumento del blanqueo de coral y mortalidad; migración de especies; incremento de afloramiento de algas; disminución del oxígeno disuelto	Alto grado de confianza (en torno a 8 sobre 10) en que el aumento de la temperatura superficial del agua costera es mayor que el aumento de la temperatura superficial del mar global.	La temperatura superficial del mar en la costa aumentará con el aumento de temperatura proyectado con un grado de confianza alto (en torno a 8 sobre 10)

Factores climáticos	Efecto	Tendencias	Proyecciones
Aportaciones de agua dulce	Cambio en los riesgos de inundaciones en el curso bajo de los ríos; modificaciones en la calidad del agua y salinidad; alteración de las aportaciones sedimentarias de los ríos; alteraciones de la circulación y aportaciones de nutrientes	Tendencia negativa neta en el volumen anual de contribuciones de agua dulce con un grado de confianza medio (evidencia limitada, en torno a 5 sobre 10).	Incremento general en latitudes altas y en las zonas tropicales húmedas y descenso en otras regiones tropicales con un grado de confianza medio (en torno a 5 sobre 10).
Aumento de la concentración atmosférica de CO ₂	Aumento del CO ₂ en el océano: incremento de la fertilización por CO ₂ ; disminución del pH del agua	Grado de confianza alto (en torno a 8 sobre 10) de aumento general con alta variabilidad local y regional.	Incremento de tasas sin precedentes pero con variabilidad local y regional con un grado de confianza alto (en torno a 8 sobre 10).

Tabla 2. Principales factores climáticos de cambio para los sistemas costeros, sus efectos, tendencias y proyecciones. (Fuente IPCC-AR5)

Entre los factores de cambio de origen no climático se pueden considerar el desarrollo socioeconómico; el cambio en la aportación de nutrientes a las aguas costeras; la hipoxia o la retención de sedimentos aportados por los ríos.

A continuación se hace una descripción de los principales factores de cambio de origen climático y de origen antropogénico. Debido a la importancia de la subida del nivel medio del mar, que es considerado uno de los principales efectos del cambio climático en las costas, se ha optado por hacer una descripción exhaustiva de sus componentes y procesos en un apartado independiente. A lo largo del texto se resumen trabajos de la literatura científica, se citan conclusiones y se manejan escenarios de subida del nivel medio del mar y otros factores climáticos contemplados en los informes Cuarto (AR4, 2007) y Quinto (AR5, 2013) del Grupo I de Trabajo del IPCC. Debido a la reciente publicación del AR5 y los nuevos escenarios de proyecciones, la mayor parte de los trabajos sobre impactos referenciados aquí utilizan los escenarios de emisiones (SRES) contemplados en el AR4.

3.2. Nivel del mar relativo

El nivel del mar puede ser considerado como la combinación de tres factores: el nivel medio del mar, la marea astronómica y la sobre elevación generada por fenómenos atmosféricos (marea meteorológica). La marea astronómica es un fenómeno determinista

gobernado por la atracción del sol y la luna que contribuye a la ocurrencia de niveles extremos del mar cuando ocurren niveles elevados de marea. Estos niveles se ven especialmente exacerbados durante las mareas equinocciales de primavera, con la influencia interanual del perigeo o con el ciclo nodal. En cuanto a la contribución de la marea meteorológica, los cambios en las tormentas combinados con el aumento del nivel medio del mar, ambos como consecuencia del cambio climático, jugarán un papel importante a la hora de modificar la frecuencia y magnitud de los niveles extremos del mar (Menéndez y Woodworth 2010).

La subida del nivel del mar debido al cambio climático se manifiesta como una de las principales amenazas para los sistemas costeros y zonas bajas de todo el mundo (Nicholls y Cazenave 2010). También hay una mayor preocupación sobre el aumento de los niveles del mar extremos debido al aumento de tormentas y a las mayores olas que se superponen sobre este nivel medio en aumento.

El nivel medio del mar es una variable de cambio lento pero continuado. La subida del nivel del mar en un determinado punto del globo es una medida relativa que se compone del cambio en el nivel del mar regional y los cambios en los movimientos verticales del terreno en ese determinado lugar. Las mayores influencias que actúan sobre el nivel del mar son de largo plazo, y van acompañadas de un sustancial retraso entre la causa y el efecto.

El nivel del mar relativo tiene en cuenta la suma de las componentes global, regional y local de la subida del nivel del mar. Ya hemos hablado del nivel del mar global y las causas de su ascenso. Las componentes regional y local tienen que ver con los modos naturales de variabilidad del clima y los movimientos verticales de la corteza terrestre, entre los que se encuentran los movimientos tectónicos, el ajuste por isostasia glacial y la subsidencia inducida por causas naturales o antropogénicas (Church et al. 2011).

La variabilidad natural del clima tiene influencia sobre el nivel del mar en diferentes regiones del globo, dando lugar a la componente regional del nivel del mar. Por ejemplo, en la zona ecuatorial del Pacífico, muy influenciada por el fenómeno de El Niño – Oscilación del Sur (ENOS), el nivel del mar puede sobre elevarse más de 40 cm en los años de Niño (Walsh et al. 2012). El ajuste por isostasia glacial es la elevación de las masas de tierra (recuperación elástica del manto) producida por la desaparición del hielo tras la última glaciación (hace 18.000 años). Así, las zonas de latitudes altas que durante la glaciación estaban cubiertas de hielo están sufriendo un ascenso y, por lo tanto, disminuyendo el aumento del nivel del mar, tal es el caso del norte del Mar Báltico o la Bahía de Hudson en Canadá (Peltier 2004). Por último, la subsidencia es un proceso común en las llanuras costeras. La subsidencia natural se debe a la consolidación del terreno debido a la acumulación de sedimentos, como ocurre en los deltas (el caso más claro en España es el Delta del Ebro). Sin embargo, la extracción de recursos del subsuelo como son gas, petróleo o aguas subterráneas acelera las tasas de subsidencia natural y subida del nivel del mar en un orden de magnitud (Syvitski 2008). El incremento de la consolidación del suelo debido a cargas artificiales y edificios también acelera la subsidencia contribuyendo a la subida del nivel del mar regional. Este es el caso de numerosas ciudades costeras de Asia construidas sobre zonas deltaicas y que

están sufriendo altas tasas de subsidencia, como Tokyo, Bangkok, Shanghai, Jakarta o Manila.

Por tanto, la subida del nivel del mar relativo es, solo parcialmente, una respuesta al cambio climático (en la componente global del nivel del mar) y varía de un lugar a otro de la costa.

3.2.1. Nivel medio del mar global

La subida del nivel del mar global es debida fundamentalmente a dos factores: 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, 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.

El ascenso medio del nivel del mar global entre 1880-2009 ha sido aproximadamente de 210 mm (Church y White, 2011). 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 (Figura 7). La estimación en la tasa de ascenso para la era satelital corresponde a $3,2 \pm 0,4$ mm/año, mientras que para el período precedente es de $2,8 \pm 0,8$ mm/año.

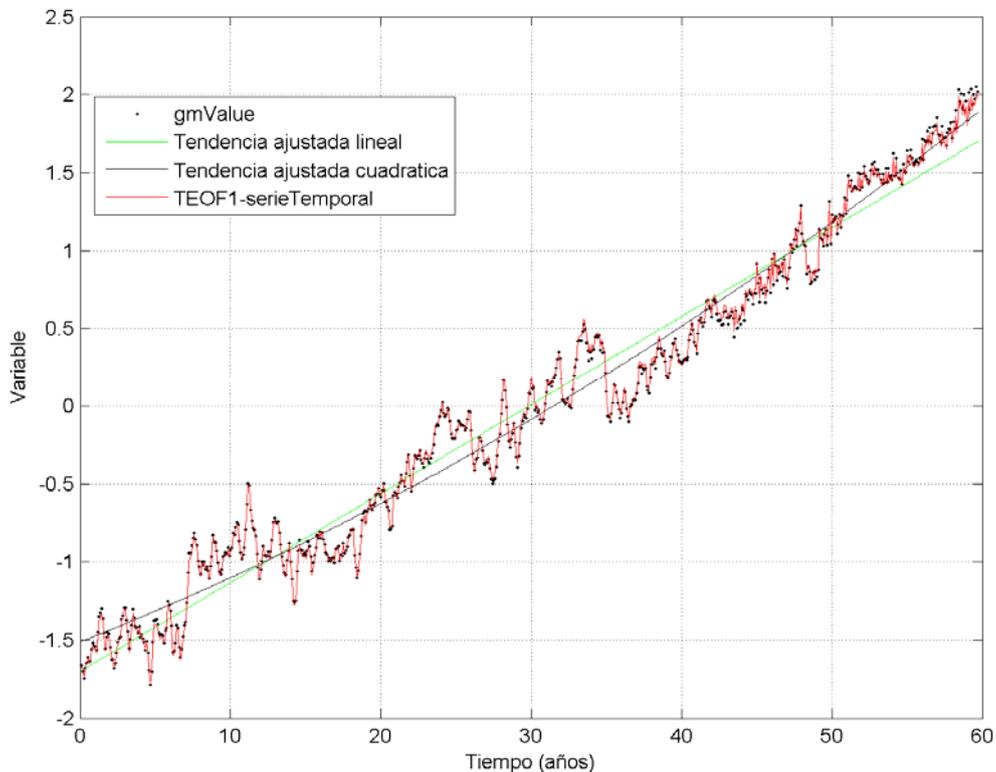


Figura 7. Tendencia y reconstrucción obtenida para el nivel medio del mar global. En rojo se representa la serie temporal del primer modo de la Trend-Eof mientras que los puntos negros (no coincidentes) representan el nivel medio global de la base de datos instrumental. Además, en verde y negro se representa las tendencias ajustadas, lineal y cuadrática, respectivamente. Fuente: IH Cantabria.

Además de conocer cómo ha cambiado el nivel del mar en los últimos años también interesa conocer o estimar como lo hará a lo largo del próximo siglo. En este caso hablamos de proyecciones de nivel medio del mar, es decir, valores de aumento del nivel medio del mar estimados para un determinado horizonte (normalmente a finales del siglo XXI). El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC corresponde a sus siglas en inglés) proporciona las proyecciones de subida de nivel del mar más fiables, basada en unos determinados escenarios de emisiones (escenarios SRES). Las proyecciones de cambio climático del IPCC están basadas en observaciones, análisis paleoclimáticos y simulaciones del sistema climático mediante modelos numéricos. Desde 1990 hasta finales del siglo XXI el IPCC estimó en su Cuarto Informe de Evaluación (AR4) un aumento del nivel del mar en el rango de los 18-70 cm. Sin embargo, tal y como se recogió explícitamente en el Informe de Síntesis del IPCC (IPCC, 2007), los valores de las proyecciones del AR4 no proporcionaban una cota superior de la subida del nivel del mar en el siglo XXI debido a las incertidumbres asociadas al deshielo de Groenlandia y la Antártida. Las observaciones de los últimos años se sitúan en el intervalo superior de las proyecciones. Procesos dinámicos como la pérdida de las plataformas de hielo flotantes, debido al calentamiento de las aguas, que preceden a los glaciares da lugar a una pérdida de hielo más rápida que el deshielo de las capas superficiales por si solas, efecto

que se ha observado en la Península Antártica (Cook et al. 2005). Por esta razón, desde el año 2007 ha habido un amplio debate sobre las estimaciones del IPCC y se han publicado nuevos y mayores valores de la subida del nivel del mar basados en diferentes evidencias (Nicholls et al. 2011). Modelos semiempíricos tales como el obtenido por Vermeer y Rahmstorf (2009) muestran valores para finales de siglo de entre 75 cm (nivel superior de las proyecciones del AR4) y los 2 m. Parece haber un creciente consenso entre la comunidad científica de que la cota superior de subida del nivel del mar estimada por el IPCC se alcanzará a finales de siglo y que un aumento de más de 1-1,5 m no puede ser despreciado (Steffen 2009).

En vista de los resultados científicos obtenidos en los últimos años el IPCC decidió crear un nuevo conjunto de escenarios que reflejaran los avances en la investigación, la nueva disposición de datos y la mejora en la sofisticación de los modelos numéricos. Estos nuevos escenarios, denominados Rutas Representativas de Concentración (RCP según sus siglas en inglés), son la base del Quinto Informe de Evaluación (AR5). La manera de crear los nuevos escenarios difiere de la utilizada en el desarrollo de los anteriores. Los nuevos RCP tratan de asegurar una mejor integración entre los forzamientos socioeconómicos, los cambios en el sistema climático y la vulnerabilidad del sistema natural y humano. En este caso no se plantean escenarios socioeconómicos que dan lugar a diferentes tasas de emisión de gases de efecto invernadero, sino que como punto inicial se toman diferentes alternativas de emisiones de gases de efecto invernadero: un escenario de bajas emisiones en el que se alcanza el pico a mitad del siglo XXI (RCP2.6), un escenario cuyos forzamientos radiativos se estabilizan antes de 2100 (RCP4.5), un escenario en el que los forzamientos radiativos se estabilizan después de 2100 (RCP6.0) y un último escenario representativo de altas concentraciones de gases de efecto invernadero (RCP8.5). La respuesta del nivel del mar a los forzamientos de cada RCP se muestra en la Figura 8, comparativamente con la respuesta del escenario SRES A1B. Como se puede ver en la Tabla 3, que resume las proyecciones de nivel del mar para cada uno de los RCP con sus bandas de confianza, hasta el año 2050 el nivel del mar aumenta a una tasa similar para los cuatro escenarios, con un aumento en el entorno de 0,17-0,38 m sobre el nivel del mar de referencia en el período 1980-2000. Sin embargo, para finales del siglo XXI, la elección de un escenario u otro supone claras diferencias en el nivel del mar, variando de 0,28 a 0,97 m.

Escenarios RCP	Subida del nivel del mar (m)	
	2046-2065	2100
RCP2.6	0,24 [0,17 – 0,31]	0,43 [0,28 – 0,60]
RCP4.5	0,26 [0,19 – 0,33]	0,52 [0,35 – 0,70]
RCP6.0	0,25 [0,18 – 0,32]	0,54 [0,37 – 0,72]
RCP8.5	0,29 [0,22 – 0,37]	0,73 [0,53 – 0,97]

Tabla 3. Proyecciones de nivel medio del mar global en m relativo al período 1986-2005, basado en la expansión termal de los océanos calculada mediante modelos climáticos, la contribución de los glaciares, Groenlandia y Antártida, y la contribución de reservas de agua terrestre. Los resultados muestran el valor medio y los límites superior (intervalo de confianza del 95%) e inferior (intervalo de confianza del 5%). Fuente: WGI, AR5 (IPCC, 2013) Resumen ejecutivo y secciones 12.4.1, 13.5.1, y 13.5.4.

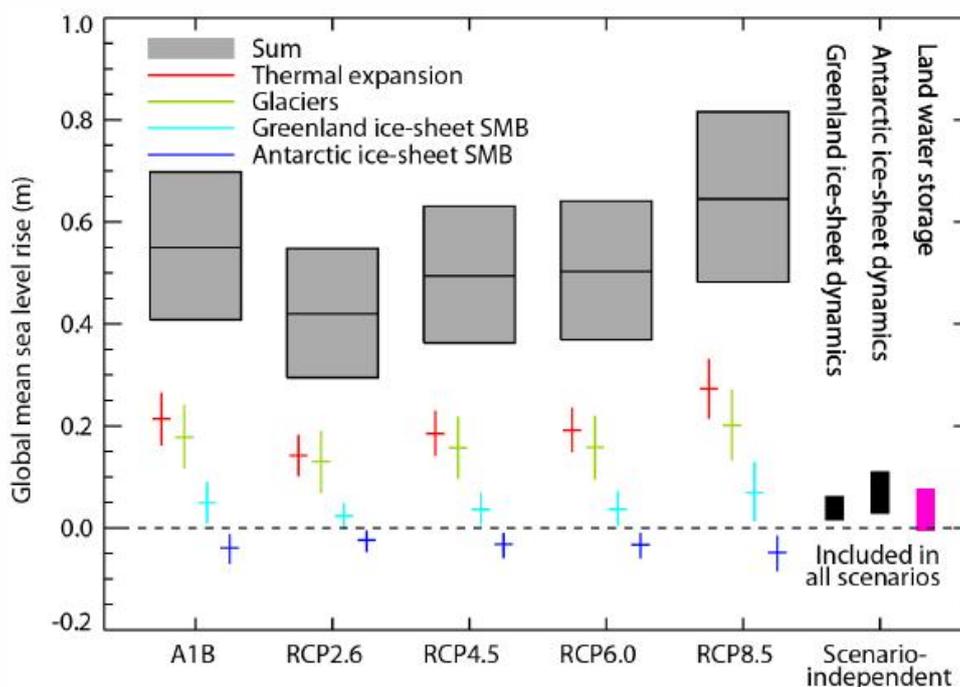


Figura 8. Proyecciones e incertidumbre (rangos del 5 al 95%) de medias globales de aumento del nivel del mar y sus componentes en el período 2081 a 2100 (relativo al período 1986-2005) para los cuatro escenarios RCP y el escenario SRES A1B utilizado en el AR4. Fuente: WGI, AR5 (IPCC 2013).

3.2.2. Nivel medio del mar regional

En los mares que bañan la costa española el nivel medio del mar, analizado en los últimos 60 años con la reconstrucción de observaciones, muestra una tendencia ascendente generalizada, con valores que oscilan espacialmente entre los 1,5 mm/año del Mar Mediterráneo, los 2 mm/año en el Mar Cantábrico y 2,5 mm/año de las inmediaciones de las Islas Canarias. La Figura 9 muestra un mapa (resolución espacial 0,25°) con los cambios de nivel del mar obtenidos a partir de datos satelitales de las misiones TOPEX/Poseidon, Jason-1 y Jason-2. Estas tendencias se han obtenido a partir de 19 años (1993-2012) de datos, con lo que pueden estar afectadas por variaciones decadales regionales. Además, las tendencias mostradas son el resultado de muchos factores con variaciones a distintas escalas de tiempo como el movimientos de la corteza terrestre, el ajuste isostático glacial, los vientos marinos locales o la variación de la densidad del agua de mar (entre otros). Por ello, una interpretación de las tendencias locales requiere tener en consideración estos efectos. Las series temporales mensuales proceden de los mareógrafos de Santander, Vigo, Málaga y Arrecife (Lanzarote) del Instituto Español de Oceanografía (IEO). La serie mensual global que se muestra junto con los mareógrafos (línea roja) se ha estimado a partir datos procedentes de mareógrafos en todo el mundo (Church and White, 2011).

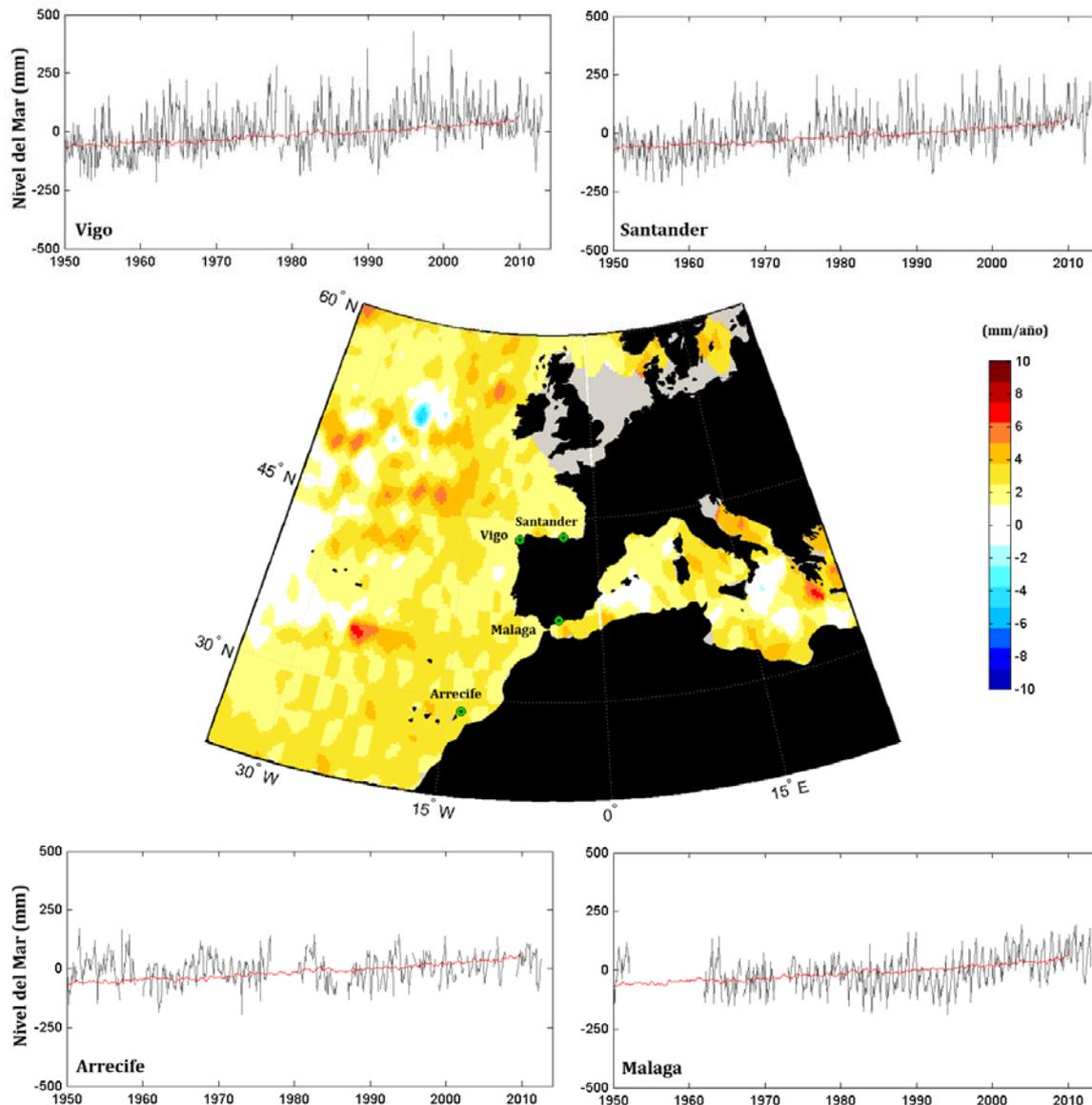


Figura 9. Mapa con los cambios estimados del nivel del mar durante el periodo 1993-2012 a partir de datos de altimetría de satélite. También se muestran los cambios relativos de nivel del mar medidos in-situ en diferentes estaciones de la costa española para el periodo 1950-2013 (línea gris) y para comparación con los registros locales se muestra el cambio global del nivel medio del mar (línea roja). Fuente: IH cantabria.

En España se han llevado a cabo más estudios para estimar la subida del nivel del mar en su entorno. 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 en cada lugar. 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) y niveles más bajos o negativos en el Mediterráneo (-0,61 mm/año en Alicante y 0,48 mm/año en Ceuta).

El Instituto Español de Oceanografía (IEO) también estudió las tendencias del nivel del mar en el Mar Mediterráneo, dentro del estudio Cambio Climático en el Mediterráneo Español (2010). El informe concluye que desde mediados del siglo XX y hasta principios de los años 90 el nivel del mar parece haber estado dominado o, al menos, fuertemente influenciado por el forzamiento atmosférico, básicamente la acción de la presión atmosférica y del viento. Estos agentes produjeron sobre dicho periodo un descenso del nivel del mar, contrario a la tendencia general observada a nivel global para el resto del planeta. A partir de principios de los 90 parece registrarse un fuerte ascenso del nivel del mar, causado por el descenso de la presión atmosférica y el aumento de las temperaturas, con tasas de entre 2,5 mm/año y 10 mm/año. Los datos sugieren que, además del calentamiento de las aguas, otros factores como el aumento de la cantidad de la masa de agua pudieron ser responsables de esta aceleración del ritmo de ascenso del nivel del mar. Pero aún dentro de un periodo de tiempo relativamente breve, como el transcurrido desde principios de los 90 hasta el 2007, pueden apreciarse fluctuaciones importantes. Así, tras una serie de años muy cálidos que conllevaron una gran absorción de calor por las capas superficiales del mar y alcanzaron un pronunciado máximo en 1998, se observa un descenso de las temperaturas y el calor absorbido desde esta fecha y hasta 2005, o al menos se interrumpe la tendencia positiva. La Tabla 4 muestra un resumen de los estudios comentados.

Estudio	Observaciones de datos instrumentales
Marcos et al. 2005	Santander: +2,12 mm/año Coruña: +2,51 mm/año Vigo: +2,91 mm/año
Marcos et al. 2009	Atlántico: +1,84 mm/año en Santander +2,64 mm/año en Vigo Mediterráneo: -0,61 mm/año en Alicante +0,48 mm/año en Ceuta
IEO	L´Estartit y Bahía de Málaga: entre +2 mm/año y +10mm/año

Tabla 4. Cuadro resumen de los estudios hechos sobre nivel del mar en España y sus principales conclusiones. Fuente: Varios

En cuanto a proyecciones se refiere la información regionalizada es muy limitada.

A lo largo del siglo XXI el nivel del mar en las costas españolas seguirá subiendo. Las proyecciones de aumento del nivel medio del mar global para los escenarios SRES han sido regionalizadas para las costas del mundo por distintos autores. Slangen et al. (2012) obtuvo las proyecciones de subida del nivel del mar regionalizadas para los escenarios A1B, B1 y A2 mediante la agregación de los resultados de distintos modelos, considerando la contribución de los glaciares, las placas de hielo, la componente estérica del nivel del mar y el reajuste por isostasia glaciar. En cuanto al Mar Mediterráneo, cuya complejidad requiere de un estudio más detallado, Tsimplis et al. (2008) estimaron el

aumento del nivel del mar en el siglo XXI para el escenario A2 utilizando un modelo acoplado atmósfera-océano. Los mayores aumentos se localizaron en el Mediterráneo occidental, llegando a ser de hasta 25 cm frente a las costas españolas debido a la componente estérica y de hasta 6 cm más debido a variaciones en la circulación oceánica.

En cuanto a los nuevos escenarios RCP los trabajos hechos hasta el momento 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 un escenario moderado (RCP4.5) y un escenario representativo de altas emisiones de gases de efecto invernadero (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 WRCM 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 glacial, incluyendo efectos gravitacionales debidos a la redistribución de masa. La Figura 10 muestra el aumento del nivel medio del mar para los dos escenarios considerados, en el período 2081-2100, en las costas españolas, a partir de los datos de Slangen et al. (2014). En ambos casos se observa un mayor aumento del nivel del mar en las costas de Canarias, especialmente en las islas más occidentales. En cuanto a la península y Baleares también se puede observar la variación espacial, con mayores aumentos en las costas de Galicia y la costas este del archipiélago Balear.

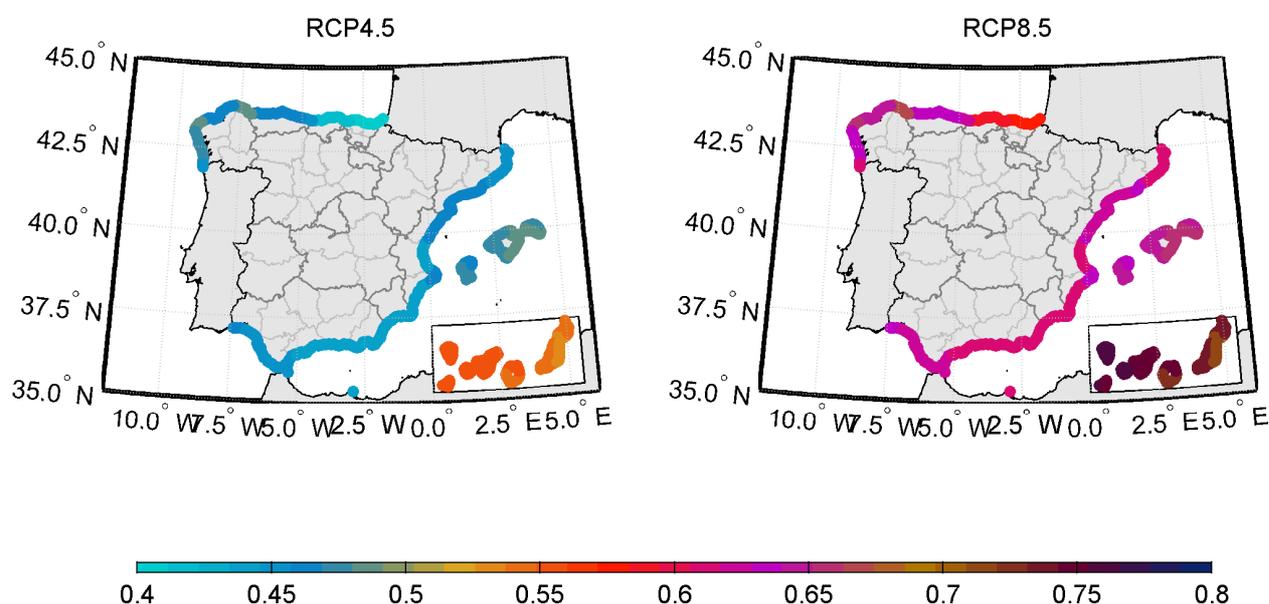


Figura 10. Proyecciones regionalizadas de aumento del nivel del mar (m) en el período 2081-2100 (con respecto al período 1986-2005) para los escenarios RCP4.5 (izquierda) y RCP8.5 (derecha) en las costas españolas. Fuente: adaptado de Slangen et al. (2014).

3.2.3. Nivel medio del mar local

Para obtener la subida del nivel del mar local en las costas españolas, a este valor regionalizado habrá que añadir los movimientos verticales de la corteza terrestre no considerados, que en este caso son los debidos a la subsidencia.

La subsidencia natural debida al aporte de sedimentos en las desembocaduras de ríos es especialmente notable en el Delta del Ebro y la desembocadura del Guadalquivir. En cuanto a valores de subsidencia en estos lugares, desgraciadamente, no existen medidas fiables para las condiciones actuales. A pesar de que el Delta del Ebro ha sido objeto de numerosos estudios los valores dados de subsidencia difieren en gran medida unos de otros, al haber sido medidos con distintos métodos y aproximaciones, de manera puntual, o como promedio espacial. Los valores estimados de la subsidencia en el Delta del Ebro están en el rango de los 2 a los 6 mm/año, siendo 3 mm/año el valor más usado y que caracteriza la subsidencia media (Ibáñez et al. 1997, Jiménez et al. 1997). Por otro lado, acciones antropogénicas como la extracción de recursos del subsuelo (agua, gas o petróleo) o la urbanización masiva aceleran la tasa de subsidencia, aunque no es este el caso del Delta del Ebro o la desembocadura del Guadalquivir.

Teniendo en cuenta estos valores de subsidencia y la regionalización de la proyecciones de aumento del nivel del mar relativo proporcionadas por Slangen et al. (2014), en la Figura 11 se muestran los valores de la subida del nivel medio del mar local (m) en toda la costa española para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Como se puede ver, las zonas que experimentan subsidencia natural como la desembocadura del río Guadalquivir, junto a la subsidencia inducida de forma antropogénica, sufrirán un mayor aumento de la subida del nivel del mar. Esta amenaza, unida a la vulnerabilidad de estas zonas bajas las convierte en puntos de especial riesgo.

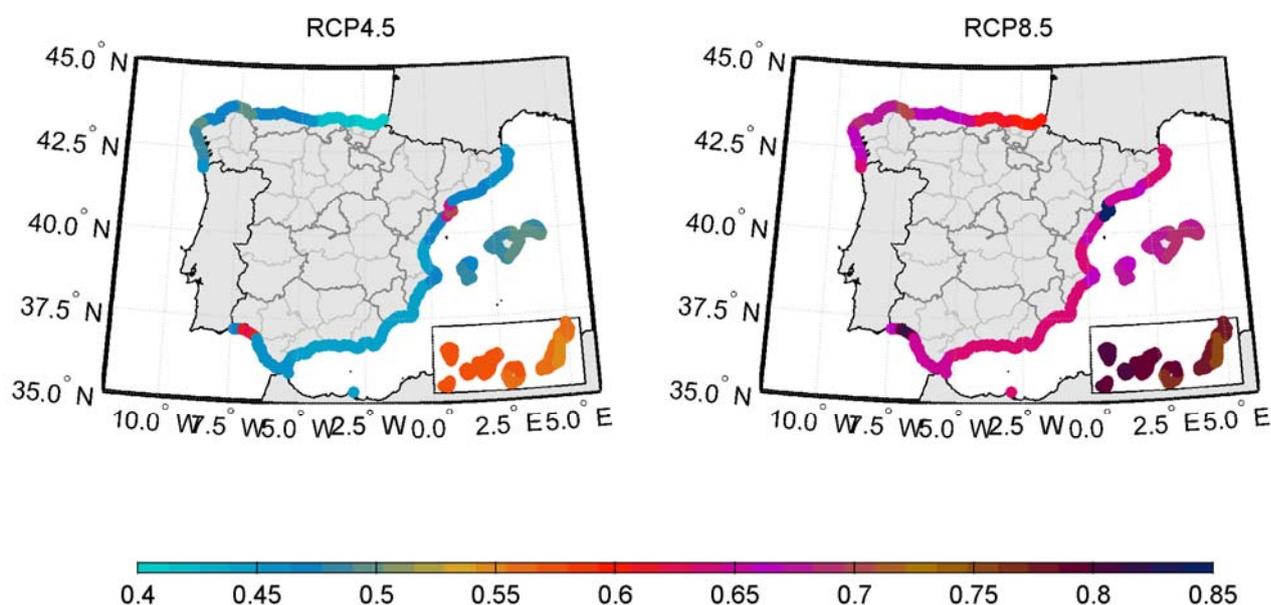


Figura 11. Proyecciones del aumento del nivel medio del mar local (m) en el período 2081-2100 (con respecto al período 1986-2005) para los escenarios RCP4.5 (izquierda) y RCP8.5 (derecha) en las costas españolas incluyendo la subsidencia natural del Delta del Ebro y la desembocadura del Guadalquivir. Fuente: IH Cantabria.

3.3. Factores climáticos de cambio

Los recientes resultados científicos muestran que el sistema climático está cambiando a un ritmo más acelerado que lo que inicialmente se pensaba, como respuesta a la emisión de gases de efecto invernadero de origen antropogénico. Estos cambios sugieren que gran parte de los sistemas costeros en España pueden verse amenazados y sufran riesgos derivados del cambio climático.

Los principales riesgos estarán asociados a la ocurrencia simultánea de varios eventos. Por ejemplo, la ocurrencia simultánea de eventos extremos de oleaje y marea meteorológica, vinculados a una fuerte tormenta, y una severa descarga fluvial, junto al aumento del nivel medio del mar. En zonas bajas y altamente urbanizadas, como ciertas zonas de Andalucía y el Levante, la combinación de estos eventos puede dar lugar a severas consecuencias económicas.

A continuación se presentan y discuten los cambios pasados y futuros de los factores climáticos en el litoral español. Los resultados aquí mostrados provienen de diferentes estudios y, en concreto, los cambios futuros se han estimado para distintos escenarios (extrapolación de tendencias, escenarios SRES, RCP, etc). En la sección 4 se presentan los escenarios de cambio climático propuestos en este estudio para llevar a cabo la evaluación del riesgo en la costa española (Capítulo 6).

3.3.1. Extremos de nivel del mar

Como ya se ha dicho previamente la marea astronómica juega un papel importante en los niveles extremos del mar. Sin embargo, debido a su carácter determinista y, por lo tanto, predecible, se va a considerar que el principal causante de los valores extremos de nivel del mar es la marea meteorológica, ligada al paso de tormentas y condiciones atmosféricas inestables. Por esta razón a continuación nos centramos en el estudio de la marea meteorológica en las costas españolas como indicador de los extremos de nivel del mar.

La marea meteorológica que ocurre por término medio una vez cada 50 años (cuantil asociado a un período de retorno de 50 años) varía en la costa española desde cerca de 0,5 m en el norte hasta en el entorno de 20 cm en las islas canarias, con valores entre 30 y 50 cm en la vertiente Mediterránea (Figura 12 izquierda). A lo largo de los últimos 60 años se han observado cambios significativos principalmente en el Mar Mediterráneo y parte del Cantábrico. Los cambios muestran una ligera disminución para los valores de mayor magnitud, con una tasa de cambio en el entorno de los -0,05 cm/año (Figura 12 derecha).

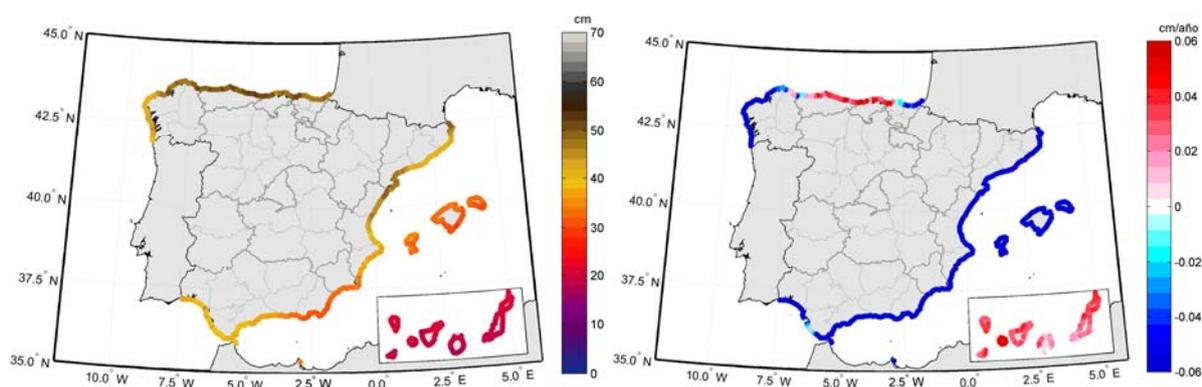


Figura 12. Marea meteorológica asociada a 50 años de período de retorno (izquierda) y tasa de cambio observada en los últimos 60 años en la marea meteorológica (derecha). Fuente: IH Cantabria.

El estudio de la contribución de la marea meteorológica a la subida del nivel del mar en Santander, Coruña y Vigo mostró tendencias negativas de -0,44, -0,27 y -0,21 mm/año respectivamente (Marcos et al. 2005), indicando que, en esta región, los forzamientos meteorológicos actúan ralentizando ligeramente la subida de nivel del mar. Estudios posteriores reafirman este hecho también en el Mediterráneo, donde los resultados mostraron que en el período 1958-2001 el efecto de los forzamientos atmosféricos había sido de disminución del nivel del mar a una tasa de -0,6 mm/año, principalmente debido al incremento de la presión atmosférica en la región (Gomis et al. 2008, Marcos et al. 2009).

Las proyecciones de marea meteorológica hechas para el litoral peninsular y balear español para el siglo XXI están basadas en los escenarios SRES del IPCC (Marcos et al.

2011). En el sur de Europa los resultados muestran una disminución del 50 % en el número de eventos extremos de marea meteorológica y hasta 8 cm en el cuantil asociado a 50 años de período de retorno (Figura 13, Marcos et al. 2011).

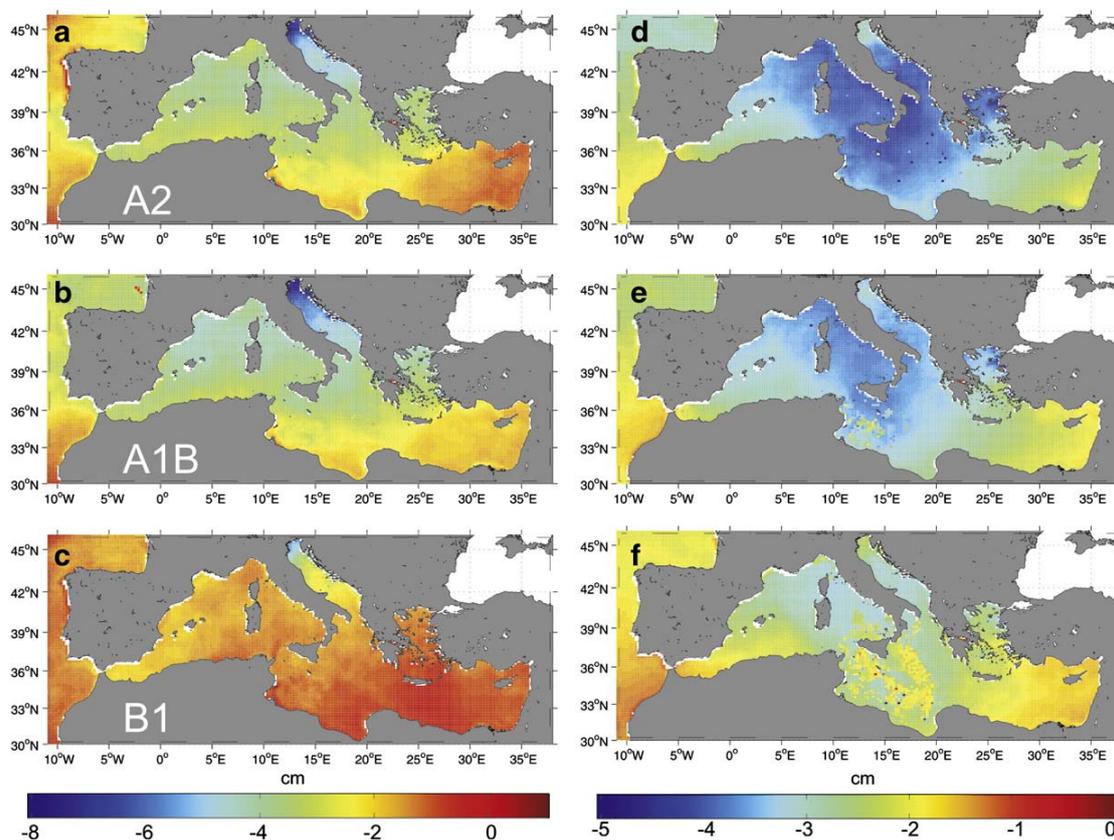


Figura 13. Cambios (cm) en el cuantil de marea meteorológica de 50 años de período de retorno en el período 2090-2099 para los escenarios A2, A1B y B1 con respecto al período 1990-1999 para sobreelevaciones positivas (a,b,c) y negativas (d,e,f). Fuente: Marcos et al. 2011.

Analizando los cambios en las estaciones se prevé una disminución del nivel del mar a lo largo del siglo XXI que será especialmente fuerte en invierno, con tendencias de hasta $-0,8 \pm 0,1$ mm/año en el Mediterráneo central bajo el escenario A2. Las tendencias de verano son menores pero positivas ($\sim 0,05 \pm 0,04$ mm/año), lo que da lugar a una mayor diferencia invierno-verano. Además, también se estiman cambios en la variabilidad interanual siendo el más importante un aumento del 40 % en su desviación estándar (Jordá et al. 2012a). La Tabla 5 recoge un resumen de los resultados de los estudios comentados.

Estudios	Observaciones		Proyecciones
	Datos instrumentales	Datos numéricos	
Marcos et al. 2005	Santander: -0,44 mm/año Coruña: -0,27 mm/año Vigo: -0,21 mm/año		
Gomis et al. 2008		Tendencia media: -0,6 mm/año Tendencia invierno: -1,3 mm/año	
Marcos et al. 2009		MM _{50%} : de -0,2 a -0,6 mm/año MM _{99%} : de -1 a -2,5 mm/año significativas en la cuenca oeste del Mediterráneo	
Marcos et al. 2011			disminución de la frecuencia de eventos extremos: 50% menos disminución de la intensidad: - 8 cm en MM ₅₀
Jordá et al. 2012a			Mediterráneo: -0,8±0,1 mm/año inviernos, escenario A2. ~0,5±0,04 mm/año veranos, escenario A2.

Tabla 5. Cuadro resumen de los estudios hechos sobre extremos de nivel del mar en España y sus principales conclusiones. Fuente: IH Cantabria.

El estudio global de extremos de nivel del mar realizado por Menéndez y Woodworth (2010) en mareógrafos de todo el mundo concluye que los principales cambios ocurridos en el último siglo en los extremos de nivel del mar son debidos a los cambios en el nivel medio. En la costa atlántica europea se observan aumentos significativos en los niveles extremos del mar cuando se consideran la marea astronómica y meteorológica. Sin embargo, al hacer el estudio únicamente para la sobre elevación meteorológica no se observan cambios significativos, lo que indica que los cambios en los niveles extremos se pueden atribuir a la variabilidad climática natural junto con la subida del nivel medio del mar.

3.3.2. Oleaje y viento

El oleaje es la respuesta de la superficie del mar a las variaciones en las condiciones atmosféricas. Cuando se produce una tormenta y soplan fuertes vientos, éstos transmiten energía al mar generando oleaje. En la zona de generación el oleaje es

desordenado y caótico, transmitiendo energía en muchas direcciones y períodos, lo que se denomina oleaje de viento o tipo *sea*. Al alejarse de esa zona, mediante procesos de dispersión radial y frecuencial el oleaje se va ordenando en torno a ciertas direcciones y concentrando su energía en períodos más altos, de manera que al llegar a la costa lo hace de forma limpia y ordenada, es el denominado mar de fondo o tipo *swell*. Además, hay que tener en cuenta que el oleaje en costa no tiene por qué responder al mismo patrón o comportamiento que en aguas profundas. La franja costera absorbe la mayor parte de la energía transportada por el oleaje que es finalmente disipada fundamentalmente por rotura.

Al ser el oleaje un proceso bastante complejo de estudiar, generalmente se utilizan parámetros agregados que lo caractericen, como la altura de ola, el período o la dirección. El análisis estadístico de estos parámetros permite conocer el clima marítimo de una zona, que son las condiciones de largo plazo de la dirección, frecuencia, energía y eventos extremos de las olas.

3.3.2.1. Características del oleaje en España

A lo largo de la costa española el oleaje sufre una clara variación espacial (Izaguirre et al. 2010, Camus et al. 2013). El Mar Cantábrico presenta el clima marítimo más severo, con oleajes dominantes del noroeste, con altura de ola media en torno a 2-2,5 m y período de pico medio de 10 segundos (Figura 14). Muchos de estos oleajes generados al sur de Groenlandia por las borrascas noratlánticas llegan también, pero más atenuados, a las costas norte de las Islas Canarias y al Golfo de Cádiz, afectados en este último caso por el efecto del Cabo San Vicente, siendo la altura de ola media de 1-1,5 m y el período de pico de 7-8 segundos. En el Mediterráneo el clima marítimo es más suave, caracterizándose por alturas de ola más pequeñas (altura de ola media en torno a 1-1,5 m) y períodos más cortos (5-6 segundos).

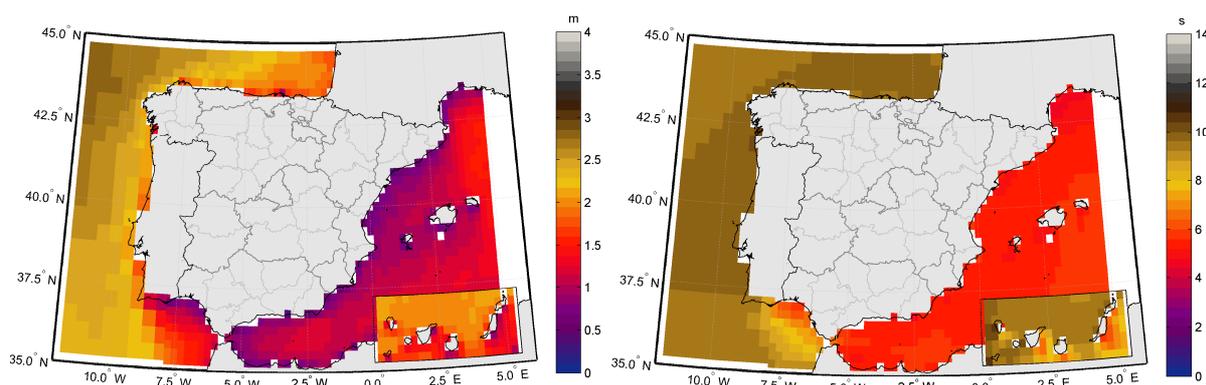


Figura 14. Altura de ola media anual en profundidades indefinidas en el entorno español (izquierda) y período de pico medio en profundidades indefinidas en el entorno español (derecha). Fuente: IH Cantabria.

Además de la variabilidad espacial, la latitud a la que nos encontramos hace que haya una marcada variación estacional. Así, durante el invierno los oleajes son más severos, registrándose temporales de 9 m de altura de ola para períodos de retorno de 50 años en el Cantábrico y hasta 6 m en el Golfo de León (Izaguirre et al. 2010). Sin embargo, durante el verano el clima marítimo en el Cantábrico es mucho más suave (con altura de ola media en torno a 1 m), siendo característicos los oleajes de corto período generados por los vientos del nordeste. También es destacable, en el levante español, el fenómeno de la gota fría que ocurre en los meses de Septiembre-Octubre y da lugar a fuertes eventos de oleaje.

Por otro lado, también es conocida la variación del oleaje de unos años a otros. Estas variaciones interanuales que hacen que unos años el clima marítimo sea más severo o más suave que otros están relacionadas con patrones atmosféricos y oceánicos de baja frecuencia que condicionan el clima en Europa. La Oscilación del Atlántico Norte (NAO de sus siglas en inglés, Barnston y Livezey 1987) es el fenómeno climático que afecta principalmente al clima de nuestra región. Este fenómeno se caracteriza por una anomalía de presión entre el sistema de bajas presiones en Islandia y de altas en las Azores respecto a su situación normal. Cuando la diferencia entre estos centros de presiones es mayor de lo normal (fase positiva de la NAO) las trayectorias de las borrascas sufren un desplazamiento hacia el norte, dando lugar a condiciones más frías y húmedas en el norte de Europa y más cálidas y secas en el sur (zona de la Península Ibérica). Por el contrario, cuando la anomalía es negativa las borrascas sufren un desplazamiento de su trayectoria hacia el sur dando lugar a condiciones más frías y lluviosas en el sur de Europa. El cambio en las trayectorias de las borrascas tiene su implicación sobre el oleaje, produciéndose mayores olas en el Cantábrico en los años de fase positiva de la NAO (Izaguirre et al. 2010, Izaguirre et al. 2011). Existen otros patrones climáticos conocidos como el patrón del Atlántico Este, el patrón del Atlántico Este/Oeste de Rusia (Barnston y Livezey 1987) o la Oscilación del Mediterráneo Occidental (Martin-Vide y López-Bustins, 2006) cuyas fases negativas potencian los oleajes más severos sobre el Mediterráneo español (Izaguirre et al. 2010).

Hasta ahora hemos hecho una descripción general del oleaje en aguas abiertas, pero como ya se ha mencionado, cuando el oleaje llega a la costa sus características pueden ser muy diferentes. A medida que el oleaje se acerca a la costa y la profundidad va disminuyendo, éste sufre una serie de procesos físicos que transforman su energía. Las irregularidades batimétricas y disminución del fondo producen refracción en los frentes de onda y por lo tanto su giro y disminución o incremento de energía. Los cabos, diques y otros accidentes geográficos producen difracción/refracción, y por lo tanto cesión lateral de energía y giro de los frentes. Cuando la llegada a costa es inminente y la reducción en la profundidad marcada se produce el asomeramiento, y por lo tanto el peralte de las olas, y por último, la rotura, que es el mayor mecanismo de disipación de energía.

En costa el oleaje conserva el patrón de variabilidad espacial y temporal, pero el clima marítimo es más suave. En el Cantábrico, el valor de la altura de ola media anual está en torno a 1-1,5 m mientras que en el Mediterráneo apenas llega a 1 en algunos sitios. La variación espacial de las mayores olas en la costa refleja las zonas protegidas de los

mayores temporales, como por ejemplo Gijón al abrigo del cabo Torres o en el norte o Almería, abrigada por su bahía y el Cabo de Gata (Figura 15).

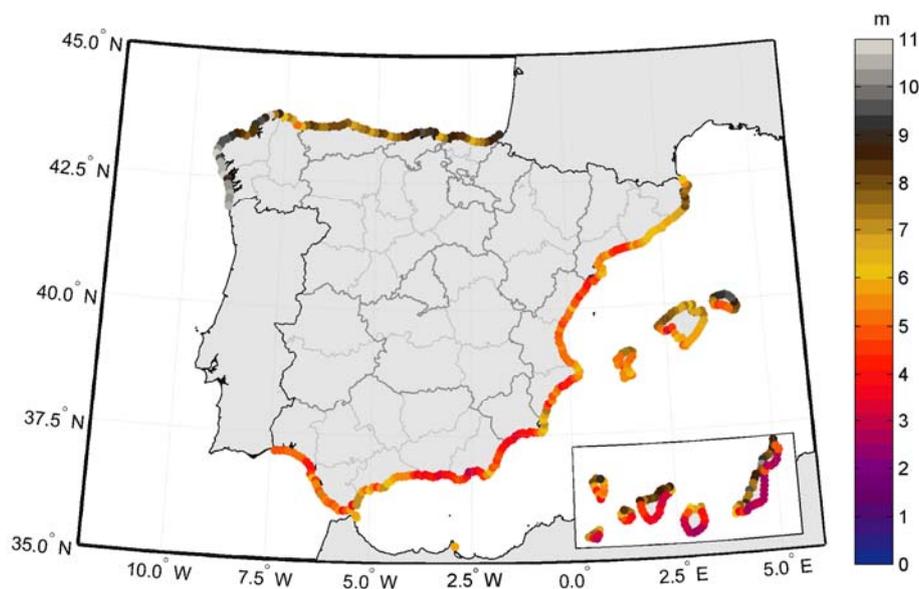


Figura 15. Altura de ola asociada a 50 años de período de retorno en la costa española. Fuente: IH Cantabria.

3.3.2.2. Cambios observados en el oleaje

Aguas profundas

Con base en el análisis de datos de boyas, satélite y reanálisis numérico, en los últimos 60 años se han observado aumentos significativos en la región norte peninsular (vertiente cantábrica y costa gallega) de 0,2 cm/año y reducciones en Canarias (del orden de -0,1 cm/año), más leves en la costa Mediterránea. Son especialmente notables los cambios más intensos y significativos detectados durante la época de invierno, entorno a 1,4 cm/año, y suaves en verano, lo cual supone un aumento en el rango de variación estacional mantenido en las últimas seis décadas (mayor variación invierno-verano).

Los cambios detectados en el oleaje más intenso y energético (percentil 95 de altura significativa, H_{s95}), muestran un incremento significativo (nivel de significancia mayor del 95 %) en el Cantábrico de hasta 0,8 cm/año y un descenso significativo de aproximadamente -0,4 cm/año en la costa sureste de las islas de Lanzarote, Fuerteventura, Gran Canaria y Tenerife. Estos patrones espaciales son similares a las condiciones medias para las alturas de ola, pero de aproximadamente el doble en magnitud. Comparado con los cambios en las condiciones medias, estos resultados indicarían un mayor rango de variación entre las condiciones altas y medias de alturas de

ola en la costa Mediterránea y un aumento en el Cantábrico y descenso en Canarias en toda la distribución de rangos de altura de ola de forma sostenida.

Con respecto a los periodos del oleaje, factor importante para el rebase sobre playas y estructuras, entre otras variables, el periodo de pico muestra una tendencia creciente en todo el Atlántico especialmente en la zona sur de las islas Canarias, donde se han estimado aumentos tendenciales de medio segundo para el año 2030. Esto, junto a un aumento de las alturas de ola, reflejaría un mar más energético a lo largo de las últimas seis décadas. Respecto a posibles cambios en la dirección dominante del oleaje, los cambios históricos indican cambios significativos sólo en la Costa Brava de Cataluña y el sur del Delta del Ebro, con un ligero giro en sentido anti-horario en la dirección del flujo medio de energía a escala anual de alrededor de $0,2^\circ/\text{año}$, que indica oleajes procedentes más del oeste que del norte. Este cambio principalmente sería un reflejo del cambio en las zonas de generación en el Mediterráneo de las borrascas dominantes sobre el oleaje en el litoral norte peninsular.

La energía del oleaje y la potencia eólica son variables relacionadas, con un comportamiento relativamente parecido, ya que ambas variables están controladas por los patrones de circulación atmosférica en el Atlántico norte (Figura 16). Las observaciones de los últimos 60 años muestran un aumento fuerte de la potencia del viento en el Cantábrico (por encima de $0,6 \text{ W/m}^2/\text{año}$), y una disminución más suave en Canarias y el Mediterráneo (entre $0,2$ y $0,4 \text{ W/m}^2/\text{año}$). Se ha observado también que en los meses de invierno se produce un aumento muy fuerte de la variabilidad en el Cantábrico y Baleares, que no se mantiene a lo largo del año, es decir, que en los meses de invierno la intensidad de los vientos es cada vez más dispar. Por el contrario, en las islas Canarias, los vientos tienen intensidad más constante en los meses de verano.

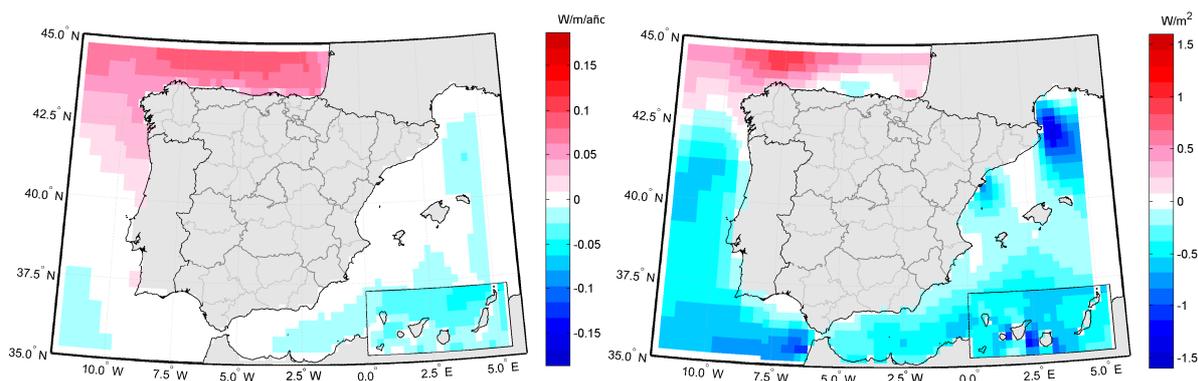


Figura 16. Tasa de cambios observados en el flujo medio de energía del oleaje (izquierda) y la potencia eólica (derecha) en los últimos 60 años. Fuente: IH Cantabria.

Con respecto a las olas más grandes, la altura de ola asociada a 50 años de periodo de retorno aumenta en ciertas zonas del Atlántico Norte, en hasta 4 cm/año al oeste de la península, pero no presenta un patrón claro de cambio. De mantenerse en el horizonte

cercano, esto supondría aumentos superiores a 20 cm para 2030 en el oleaje de los temporales en el Cantábrico y por encima de 70 cm en la costa atlántica de Galicia y del Golfo de Cádiz.

Aguas costeras

Una vez que el oleaje llega a costa es necesario conocerlo y caracterizarlo, puesto que esa información será crucial para el diseño de infraestructuras, gestión adecuada de la costa, etc. La altura de ola significativa media anual es un indicador de cómo el clima marítimo evoluciona bajo condiciones medias, influenciando las actividades portuarias entre otras. La altura de ola significativa sólo excedida 12 horas al año, H_{s12} , está íntimamente relacionada con la profundidad de cierre del perfil de playa (Birkemeier 1985) y, por lo tanto, con la erosión potencial, así como el flujo medio de energía, que está relacionado con el transporte de sedimentos y la forma en planta de playas encajadas (González y Medina 2001).

En la costa Cantábrica, donde mayores valores de H_{s12} se registran, se ha observado un aumento de esta variable con valores entorno a los 1,4 cm/año en los últimos 60 años. Por el contrario, en el litoral Mediterráneo se ha observado una tendencia negativa en la H_{s12} con valores de hasta -0,6 cm/año en la costa de Castellón y hasta -0,4 cm/año en la Bahía de Almería.

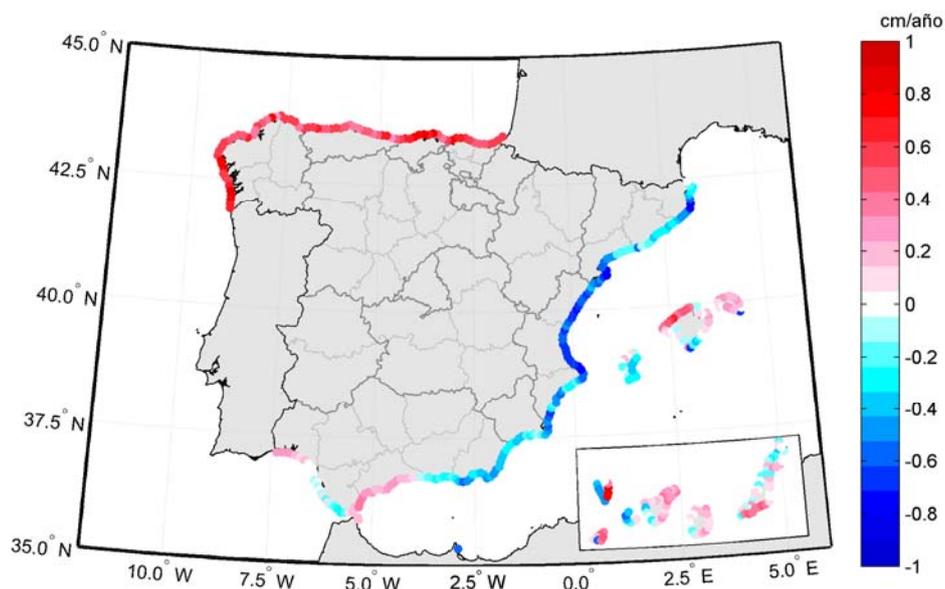


Figura 17. Tendencia de cambio observada en los últimos 60 años en la altura de ola sólo superada 12 horas al año, H_{s12} . Fuente: IH Cantabria.

El flujo medio de energía y su dirección presentan una tendencia de cambio media anual mucho menos acusada que en profundidades indefinidas debido al efecto de los fenómenos de propagación. Solo se obtienen cambios positivos muy probables en el Cantábrico oriental (hasta 50 W/m/año) y fiables en el resto de esta cuenca, del mismo orden de magnitud. La dirección del flujo medio de energía, sin embargo, no presenta cambios fiables en ningún punto del litoral español.

Por último, el estudio de la tendencia de largo plazo en las mayores olas en la costa desvela que no se han producido cambios significativos en la mayor parte del litoral español. Tan solo se registra una ligera disminución en la costa de Coruña (-2,5 cm/año), la bahía de Algeciras y el sur del Delta del Ebro (-1,5 cm/año).

3.3.2.3. Proyecciones de oleaje

Si bien el nivel del mar ha sido más ampliamente estudiado, a día de hoy hay muy pocas estimaciones de cómo cambiarán las olas a lo largo del siglo XXI para los distintos escenarios de cambio climático. Las proyecciones globales de oleaje se reducen a unos pocos estudios hechos para los escenarios SRES (Wang y Swail 2006; Caires et al. 2006; Mori et al. 2010) y un estudio más reciente hecho con los nuevos escenarios RCP (Hemer et al. 2013). Hasta ahora, no existían proyecciones de clima marítimo de alta resolución para todo el litoral español, pero los resultados obtenidos en el proyecto C3E para los escenarios A2, A1B y B1 muestran una fuerte discordancia con las tasas de cambio observadas.

Las proyecciones de altura de ola media muestran una muy ligera disminución en prácticamente todo el litoral español, siendo este patrón más significativo en el Mediterráneo. Hasta el año 2040 el cambio en la altura de ola media para los tres escenarios es prácticamente nulo en la mayoría de las zonas. Es a partir de la segunda mitad del siglo XXI cuando empiezan a ser significativos los cambios en la altura de ola respecto al siglo XX. Sólo se detecta un aumento de la altura de ola significativo en la cara sureste de las Islas Canarias en todos los escenarios.

También se encuentran diferencias en el flujo medio de energía que, en el análisis histórico, presentaba patrones de variación con aumentos de hasta 0,1 kw/m en el Cantábrico y una disminución más suave en el resto del dominio. Sin embargo, las proyecciones indican disminución generalizada en la región, para todos los horizontes temporales y escenarios, siendo la significancia de este descenso mayor para los escenarios A1B y A2 que para el B1.

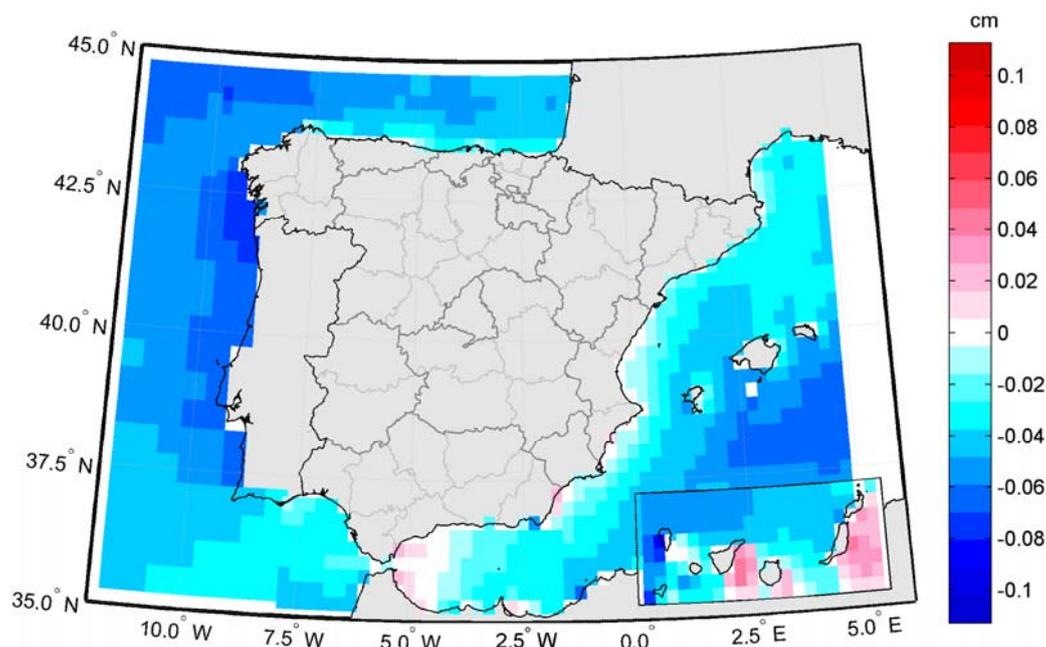


Figura 18. Proyecciones de altura de ola media para el escenario A1B en el período 2070-2100.

Existe una similitud entre las tendencias de cambio observadas con las obtenidas por las proyecciones. Sin embargo, la magnitud de las proyecciones muestra variaciones mucho más suaves, de hasta un 70% menos de intensidad con respecto al análisis histórico. Esta discrepancia puede tener su origen en la forma de cálculo de las proyecciones, basadas en la agregación de una gran cantidad de ejecuciones de distintos modelos y entidades pertenecientes al IPCC. Hoy en día los métodos de cálculo están aún en desarrollo, y el debate sobre la necesidad de agregar distintas ejecuciones y modelos o, por el contrario, trabajar con unos pocos está abierto. Las nuevas proyecciones regionales (RCM) disponibles, facilitarán la reducción de incertidumbres cuando se ejecuten nuevas proyecciones de oleaje para España.

3.3.3. Temperatura superficial del agua del mar

Los cambios en la temperatura superficial del agua tendrán fuertes efectos sobre la vida marina y los ecosistemas costeros. La gran capacidad de absorción de calor de los océanos hace que, en general, éstos se calienten más despacio que la atmósfera pero, aún así, los posibles cambios a lo largo del siglo XXI serán sustanciales.

Durante los pasados 30 años, más del 70% de las aguas litorales sufrieron un calentamiento significativo con tasas de cambio muy heterogéneas, tanto espacial como estacionalmente (Lima y Wethey 2012). La tasa media de cambio fue de $0,18 \pm 0,16^\circ\text{C}$ por década y el cambio medio en la escala estacional de $-3,3 \pm 4,4$ días por década en los 75 m superiores del océano durante el período 1970-2009 (AR5, WGI, Capítulo 3). Estos valores son significativamente mayores que los registrados para los océanos donde la tasa de cambio es de $0,1^\circ\text{C}$ por década en los primeros 75 m de agua durante el

período 1970-2009 y el cambio estacional es de -2,3 días por década (Lima y Wetthey 2012).

Las aguas costeras del litoral de la Península Ibérica experimentaron un calentamiento anual nocturno, durante el período 1985-2005, con un gradiente norte-sur que iba de los 0,12 a los 0,35°C por década (Gómez et al. 2008). Es importante destacar que el calentamiento también difiere de unas estaciones a otras, habiéndose producido principalmente en las estaciones de primavera y verano, con valores de hasta 0,5°C por década.

3.3.4. Acidificación de los océanos

Los océanos absorben alrededor del 25 % del dióxido de carbono emitido cada año por las actividades humanas. Esto da lugar a cambios en la composición química del agua del mar, incrementando la concentración de carbono inorgánico y la acidez del océano (mayor pH) al formarse ácido carbónico y disminuyendo la concentración de iones carbonato. Muchos organismos marinos utilizan los iones carbonato disueltos para construir sus caparazones o esqueletos. A medida que la concentración de iones carbonato vaya disminuyendo con el incremento del CO₂ atmosférico la tasa de formación de carbonato cálcico en especies, como por ejemplo los corales, se reducirá.

Estos cambios en la composición de los océanos han sido detectados y conocidos como acidificación antropogénica de los océanos. La disminución del pH de la superficie de los océanos va de las -0,0010 a los -0,0018 unidades al año. En contraste con el océano abierto, donde los cambios en el carbono disuelto son generalmente moderados en escalas de tiempo menores a un año, las aguas costeras sufren mayores cambios debidos a las variaciones en la intensidad de las corrientes de afloramiento (Feely et al. 2008), la precipitación de nitrógeno atmosférico y sulfuros (Doney et al. 2007), el carbonato disuelto de las reservas de agua dulce (Salisbury et al. 2008), así como el aporte de nutrientes y materia orgánica (Borges 2011, Cai et al. 2011) que controlan la producción primaria (contrarrestando la acidificación del océano) y la respiración (favoreciendo la acidificación).

La acidificación de los océanos puede tener serias consecuencias tanto ecológicas como económicas. La mayoría de los trabajos se han centrado en la investigación sobre las tasas de reducción de calcificación en organismos como los corales. Otros impactos se podrán presentar como efectos sobre la respiración de los peces y el desarrollo larvario de organismos marinos y a través de cambios en la solubilidad de nutrientes y toxinas. Las investigaciones recientes se han orientado también al estudio de las implicaciones de la acidificación oceánica en estructuras de hormigón como muelles, espigones o diques de abrigo.

3.3.5. Contribuciones de agua dulce

Los cambios en los usos del suelo y el cambio climático han modificado los cauces y caudales de los ríos y, en consecuencia, los aportes de agua dulce, sedimentos y nutrientes a los sistemas costeros (Piao et al. 2007). El uso masivo de tierras de agricultura ha incrementado la erosión, los sedimentos y la escorrentía. Aunque la modificación de los usos del suelo para agricultura comenzó de cientos a miles de años atrás dependiendo del continente, la intensificación en el cambio de los usos del suelo ha sido debida al rápido crecimiento de la población en los últimos años, lo que ha producido un incremento de la escorrentía global de 0,8 mm al año en el último siglo. La descarga de los ríos es generalmente mayor y más variable debido a la menor cantidad de obstáculos naturales al modificarse las márgenes talando y desbrozando la vegetación para el destino de distintos usos del suelo.

El ciclo hidrológico se está viendo intensificado con el cambio climático debido al incremento exponencial de la humedad específica con la temperatura. Se estima que el calentamiento global, a través de los cambios en el ciclo hidrológico, es el causante de un aumento del 50 % en la escorrentía superficial. Sin embargo los cambios a nivel regional son muy variables. La disminución de caudal sólido debido al represamiento de los ríos, como en el caso del Ebro, supone una disminución del aporte de sedimentos y, por lo tanto, un retroceso de sus desembocaduras y el aumento de inundaciones aguas arriba.

Los cambios en las descargas de los ríos tienen múltiples efectos en los sistemas costeros. Además de la calidad y cantidad de la escorrentía y caudal de los ríos, es también importante su distribución temporal. Las avenidas o descargas repentinas (debidas, por ejemplo, al alivio de embalses) sobre los sistemas marinos podrán impactar los ecosistemas costeros que no sean capaces de soportar aguas de baja salinidad y tendrán consecuencias sobre la eficiencia de los estuarios para retener o filtrar el material procedente de los ríos.

3.4. Factores antropogénicos de cambio

Los sistemas costeros están sujetos a una serie de factores de tipo no climático que pueden interaccionar con los climáticos potenciando los impactos. Fundamentalmente, los factores no climáticos están asociados a presiones de tipo humano, pero también existen de manera natural, como es el caso de la subsidencia.

Las zonas costeras albergan algunos de los ecosistemas más ricos y valorados del planeta. Sin embargo, algunos de ellos son también los más degradados debido al aumento de la presión urbana. Junto al aumento de la población en las zonas costeras se desarrollan numerosas actividades, tanto en mar como en tierra, que pueden impactar negativamente o amenazar los ecosistemas costeros.

El análisis de los riesgos de cambio climático sobre los sistemas natural y socioeconómico introduce los conceptos de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad. La peligrosidad se corresponde con los factores climáticos sometidos al cambio, ampliamente descritos en el

capítulo anterior. Y la exposición y vulnerabilidad tienen que ver con las características físicas y socioeconómicas o naturales del sistema costero.

3.4.1. Hipoxia

El excesivo aporte de nutrientes da lugar a eutrofización en las zonas costeras, que conlleva un ciclo de crecimiento masivo de algas (conocido como bloom de algas), seguido de su muerte, descomposición y agotamiento del oxígeno (hipoxia), reforzado por el calentamiento del océano, que disminuye la solubilidad del oxígeno en el agua del mar. Normalmente, el culpable es el aporte masivo de nitrógeno, que es el nutriente limitante en la mayoría de los ecosistemas costeros. A través del uso de fertilizantes químicos y combustibles fósiles el hombre está aumentando las reservas de nitrógeno en las zonas costeras. Por otro lado, la hipoxia se ve reforzada en ciertas zonas por el afloramiento de aguas profundas pobres en oxígeno.

La hipoxia y la eutrofización suponen una seria amenaza para la vida marina y los ecosistemas costeros, favoreciendo cambios en la composición de las especies, la competencia entre ellas y la aparición de especies invasoras. La hipoxia afecta fuertemente a los estuarios, donde la circulación de agua es limitada y la renovación del oxígeno ocurre lentamente. La baja concentración de oxígeno puede dar lugar a cambios en el crecimiento y metabolismo de organismos marinos, así como el aumento de su mortalidad, siendo los más sensibles los peces. Los efectos sobre los ecosistemas implican la pérdida de hábitats, pérdida de fauna fundamental y el desvío de energía de las partes altas de la cadena trófica a las zonas microbióticas a medida que los organismos mueren y se descomponen.

3.4.2. Desvío de caudales de agua dulce

El represamiento y desvío de caudales de agua dulce hechos por el hombre pueden afectar a la escorrentía y caudales vertidos al mar en las cuencas de los ríos en mucha mayor medida que el cambio climático (Wisser et al. 2010). Las principales causas son la expansión del regadío y la construcción de presas para la creación de reservas artificiales de agua, laminación de avenidas y aprovechamiento de energía hidroeléctrica, que dan lugar a la retención del 15 % de las descargas de agua a nivel global, disminuyendo el aporte de sedimentos y nutrientes a los sistemas costeros. El ejemplo más claro que tenemos en España es el río Ebro. Sobre su cauce hay construidos numerosos embalses para abastecimiento y aprovechamiento hidroeléctrico, como los de Mequinenza, Ribarroja o Flix, así como azudes, canales y trasvases para garantizar el suministro de agua en zonas industriales y urbanas (por ejemplo el Gran Bilbao o Tarragona) y el regadío en zonas de la Comunidad Valenciana y los arrozales del Delta del Ebro.

3.4.3. Pérdida de hábitat

Numerosos hábitats costeros como playas, marismas, esteros, lagunas o praderas submarinas se han perdido totalmente debido al desarrollo costero y urbanístico. La construcción de puertos, carreteras, urbanizaciones, piscifactorías o el relleno de zonas ganadas al mar han dado lugar a la pérdida directa de hábitats o a su degradación debido al efecto acumulado de presiones. La Manga del Mar Menor es un cordón litoral dunar que separa la laguna hipersalinizada del Mar Menor del Mar Mediterráneo. Hoy en día está urbanizado prácticamente en su totalidad, las playas están ocupadas por edificios, paseos marítimos, terrazas y calles, una carretera lo atraviesa de norte a sur y varios puertos deportivos albergan numerosas embarcaciones de recreo. Pese a las figuras de protección que se han ido estableciendo con el objetivo de conservar los pocos hábitats que quedan se han perdido gran cantidad de ellos, junto con numerosos ecosistemas. La Albufera de Valencia es otro ejemplo claro de pérdida de hábitat, por causas naturales y por presiones de tipo agrícola y urbanístico. La información del siglo XII indica que la Albufera tenía en aquella época unas veinte mil hectáreas, tras un proceso de pérdida de superficie imparable el humedal cuenta hoy en día con un 10 % de su tamaño original.

La pérdida de hábitat es la principal amenaza para los sistemas naturales puesto que ello conlleva la desaparición de ecosistemas y el servicio que éstos prestan. Además, la transformación de un hábitat en otro puede convertirse en permanente, al necesitar una restauración intensiva para volver a su estado original.

3.4.4. Retención de sedimentos

Los hábitats costeros dependen de un balance dinámico de entrada y salida de sedimentos para su buen funcionamiento, pero las actividades humanas pueden amenazar estos sistemas tanto aumentando como disminuyendo el balance final (Crain et al. 2009). La reducción de la cantidad de sedimentos que llega a la costa debido al represamiento de ríos, desvío de agua para regadío y extracción de áridos de los ríos es la causa del retroceso de los principales deltas del mundo, la erosión de la línea de costa, la amenaza de marismas, marjales y esteros, y el aumento de la salinidad en terrenos de cultivo y aguas subterráneas.

Por el contrario, el cambio en los usos del suelo puede incrementar el aporte de sedimentos. La deforestación del terreno da lugar a mayor erosión en eventos de inundaciones o riadas, proporcionando una mayor cantidad de sedimentos a las zonas costeras. Esta situación es especialmente dañina para los fondos rocosos, las praderas submarinas o las comunidades bentónicas. En los estuarios, por ejemplo, un incremento en la carga sedimentaria puede dar lugar al enterramiento de comunidades bentónicas y a un incremento en la turbidez de las aguas, reduciendo la penetración de la luz y dando lugar a numerosos efectos negativos.

3.4.5. Desarrollo socioeconómico

La exposición de un sistema hace referencia a los elementos en riesgo, expuestos a un peligro en una zona y periodo de tiempo determinados (adaptado de UNISDR, 2009). A lo largo del litoral español podemos encontrar diferentes elementos expuestos a los riesgos del cambio climático, tanto naturales como socioeconómicos: playas, frente urbano, puertos, diques, humedales...

En su estado originario los elementos expuestos del litoral español se correspondían en su totalidad con elementos naturales: playas, humedales, marismas, esteros... Sin embargo, la actuación del hombre a lo largo de los años, y especialmente en las últimas décadas, ha hecho que la costa esté cada vez más rigidizada y que los elementos actualmente expuestos sean, en gran parte, artificiales: paseos marítimos, edificios, puertos, diques...

Un repaso por el litoral español en la actualidad muestra una costa muy acantilada en ciertas regiones, con una extensión total de más de 4021 km de acantilados, la existencia de más de 2000 km de playa y en torno a 1271 km con características de costa baja (humedales). El resto del litoral, unos 600 km de línea de costa, ha sido transformado por obras artificiales (Arenas 2008). En el Mediterráneo español, el litoral peor conservado del país, el 32% de la costa tiene críticos niveles de degradación ambiental, el 51% de las playas urgen de alguna actuación de restauración, el 70% de las dunas están destruidas o muy deterioradas, el 60% de los ambientes de transición requieren de alguna actuación, el 40% de esa costa está ya urbanizada y el 16% es ya costa artificial, y finalmente el 57% de las playas están ya en entornos urbanizados (Ministerio de Medio Ambiente, 2007).

Uno de los elementos de mayor importancia de nuestra costa son los humedales. Desde el punto de vista ecológico, los humedales (considerando en este grupo los estuarios, deltas, marismas, esteros, lagunas, etc) son zonas de transición de gran riqueza natural vitales en la diversidad y en la sostenibilidad de las riberas del mar, los ecosistemas costeros y las pesquerías. Desde el punto de vista socioeconómico, al tener configuración de costa baja, a lo largo de los años ha sufrido numerosos usos y actuaciones. A principios del siglo XX, con la idea errónea de que las zonas de marisma suponían un problema para la salud se promulgó la Ley de Salubridad o Ley Cambó en 1918, que favorecía la desecación de marismas y la concesión con carácter indefinido de los terrenos saneados. Esta ley supuso un enorme error que dio lugar al relleno de humedales para suelo agrícola, instalación de saladares y salinas, industria, etc. Junto a esta ley, el modelo de desarrollo económico de las últimas décadas, basado en el turismo de sol y playa y el desarrollo urbanístico incontrolado en el litoral, ha supuesto unas dramáticas consecuencias: la mayor parte de las rías del Cantábrico han perdido más del 40 % de la superficie que tenían a principios del siglo XX, los estuarios históricos de Andalucía han quedado reducidos al caño principal y algunos caños secundarios (el Guadiana, el Tinto y el Odiel, el Guadalete o el Guadalquivir), los deltas se encuentran en clara regresión (Guadalfeo, Ebro, Guadalhorce...) y muchas lagunas costeras como el Mar Menor o la Albufera de Valencia han sufrido rellenos y fuertes presiones de tipo agrícola y urbano (Losada 2010).

3.4.5.1. Población

El desarrollo demográfico a lo largo del siglo XX responde a tres tendencias fundamentalmente: el despoblamiento del interior, el crecimiento de las ciudades y la densificación del litoral. En los últimos años, no obstante, la despoblación de las provincias de interior se ha revertido parcialmente y las ciudades han adoptado un crecimiento más difuso. Sin embargo, el litoral ha seguido incrementando su población a expensas incluso del propio interior de las provincias costeras (Fundación BBVA 2010).

Durante los primeros años del siglo XXI la población residente en municipios costeros se incrementó a un ritmo anual del 1,9 %, frente al 1,6 % registrado para la población total, ascendiendo en 2009 a más de 15 millones de personas. Esta población representaba un tercio del volumen demográfico de España (32,7 %) y se asentaba sobre una superficie equivalente a sólo el 6,7 % del territorio nacional. En 2009, los porcentajes más elevados de población residente en la costa se registraban en las tres provincias insulares, donde superaban el 80 % (Figura 19). En el período 2001-2009 los ritmos de crecimiento demográfico más elevados se dieron en la fachada mediterránea: en Tarragona y Girona superaron el 4 % anual y en Alicante y Castellón ascendieron a más del 3 %, tasa que también se alcanzó en numerosos municipios de Almería, Granada y Málaga (Fundación BBVA 2010).

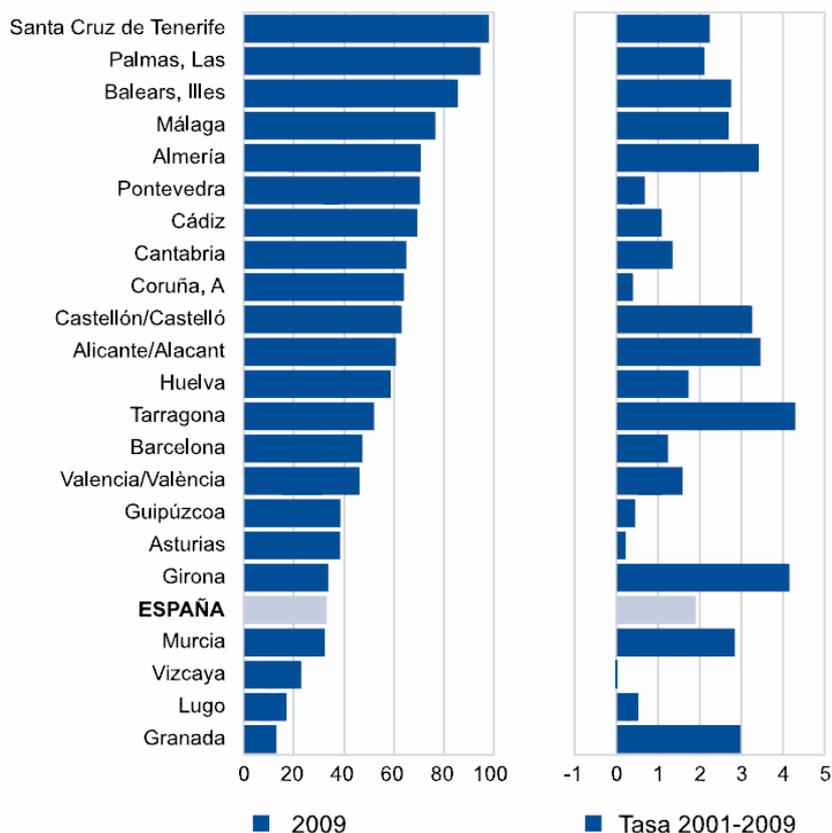


Figura 19. Población residente en la costa. 2009. Porcentaje sobre la población total y tasa de variación anual acumulativa 2001-2009. Fuente: Fundación BBVA

En cuanto a la densidad de población en los municipios costeros, en 2009 era especialmente elevada en Barcelona (5369 hab/km²) y Valencia (1682 hab/km²) debido a sus capitales, pero relativamente baja en Lugo (92 hab/km²), Murcia (157 hab/km²) o Huelva (162 hab/km²). En la Figura 20 se puede ver un gráfico de densidad de población por provincias.

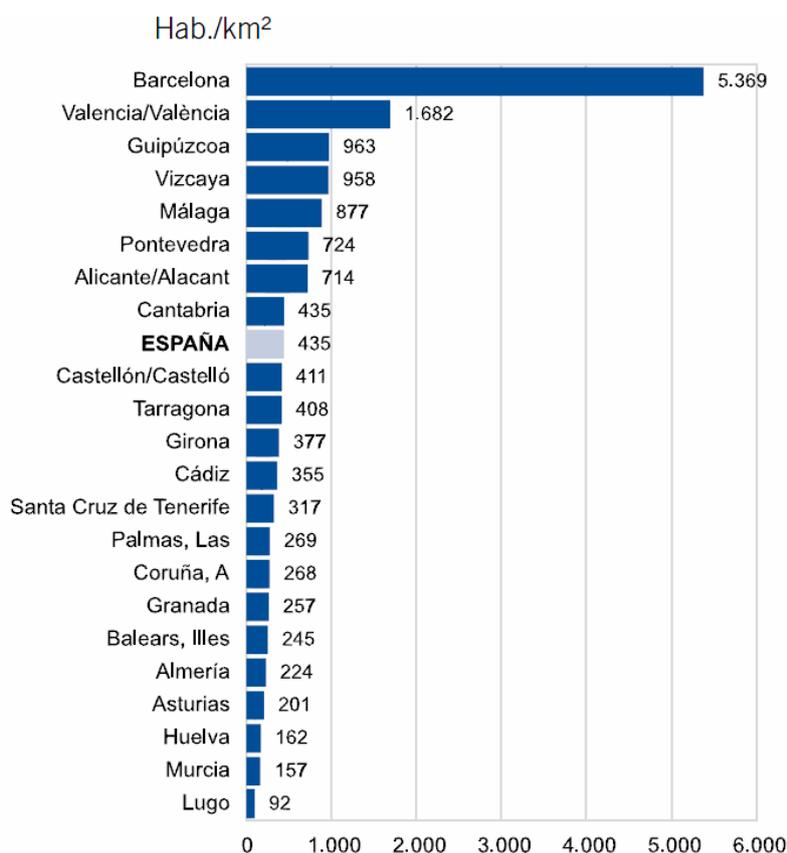


Figura 20. Densidad de población de los municipios costeros por provincias. 2009. Fuente: Fundación BBVA.

3.4.5.2. Usos del suelo

La ocupación del suelo representa sobre el territorio las políticas socioeconómicas y ambientales de una sociedad, en definitiva, de su modelo de desarrollo. Los cambios en los usos del suelo, como el crecimiento urbano disperso, el incremento de regadíos o el abandono de tierras agrícolas tienen un importante impacto en el consumo de territorio, en el equilibrio de los ecosistemas y sus poblaciones y en la sobreexplotación de recursos ambientales limitados como el agua. La costa es un recurso limitado y su adecuada gestión es un elemento clave para la sostenibilidad del desarrollo de las generaciones presentes y futuras (Observatorio de la Sostenibilidad en España 2011).

La demanda turística, residencial y de ocio que tiene la costa española, gracias a su clima y riqueza natural y cultural, ha producido destacables beneficios económicos como el crecimiento del sector turístico español. Asociado al fenómeno turístico, pero muy relacionado con el boom inmobiliario, en los últimos años ha tenido lugar un crecimiento descontrolado de la artificialización del territorio, dando lugar a un número desmesurado de viviendas e infraestructuras en nuestras costas. Este proceso de artificialización ha supuesto una enorme pérdida de bienes y servicios de los ecosistemas litorales, haciendo que este modelo de desarrollo no sea sostenible a medio plazo (Observatorio de la Sostenibilidad en España 2011). Es este modelo de desarrollo el que definitivamente puede terminar con el atractivo turístico de nuestras costas dando lugar a importantes repercusiones en el sector turístico y el PIB nacional.

En la franja de costa de los primeros 10 km, donde confluyen diferentes procesos litorales, 345765 Ha están ocupadas por superficies artificiales, lo que representa un 34 % del total de superficie artificial en España (ver Tabla 6). Las superficies artificiales en esta franja suponen un 9,3 % de su área total, casi cinco veces más que la ocupación artificial en el resto del país (2,01 %).

ÁMBITO GEOGRÁFICO	10KM	ESPAÑA	10KM	ESPAÑA	10KM
CLASES LEAC	AREA (ha)	AREA (ha)	PORCENTAJE SOBRE EL TOTAL	PORCENTAJE SOBRE EL TOTAL	PORCENTAJE DE SUPERFICIE DE CADA CATEGORÍA RESPECTO AL TOTAL EN ESPAÑA DE ESTA CATEGORÍA
Superficies artificiales	345.765	1.017.360	9,3%	2,01	34,0
Tierras de labor y cultivos permanentes	724.990	15.837.441	19,4%	31,25	4,6
Pastos y mosaicos agropecuarios	693.836	9.526.853	18,6%	18,80	7,3
Bosques y zonas de matorral boscoso en transición	930.457	13.802.422	24,9%	27,24	6,7
Praderas naturales, brezales y vegetación esclerófila	717.944	8.809.679	19,2%	17,39	8,1
Espacios abiertos con poca o sin vegetación	229.222	1.240.120	6,1%	2,45	18,5
Humedales	54.900	111.082	1,5%	0,22	49,4
Masas de agua	39.663	328.184	1,1%	0,65	12,1
TOTAL GENERAL	3.736.777	50.673.140	100,0%	100,00	7,4

Tabla 6. Ocupación del suelo en la franja de 10 km de costa y comparación con España. Año 2006. Clases LEAC (proyecto Land and Ecosystem Accounting) en el contexto de trabajo de la Agencia Europea de Medio Ambiente). Fuente: Observatorio de la Sostenibilidad en España, OSE.

En el período 1987-2000 (13 años) las superficies artificiales aumentaron 3537 Ha/año, lo que supone un 18,32 %, aunque la aceleración de este proceso se observó principalmente en el período 2000-2006 (6 años), con un crecimiento de 6063 Ha/año, un 11,53 % de aumento. Los principales procesos implicados en la artificialización del terreno son la expansión de las infraestructuras en los dos períodos y la expansión residencial difusa en el primero (Figura 21). Esto pone de manifiesto un modelo de expansión urbana difusa con importantes implicaciones territoriales y ecológicas, como

fragmentación de hábitats por el desarrollo de infraestructuras para conectar núcleos de población difusos.

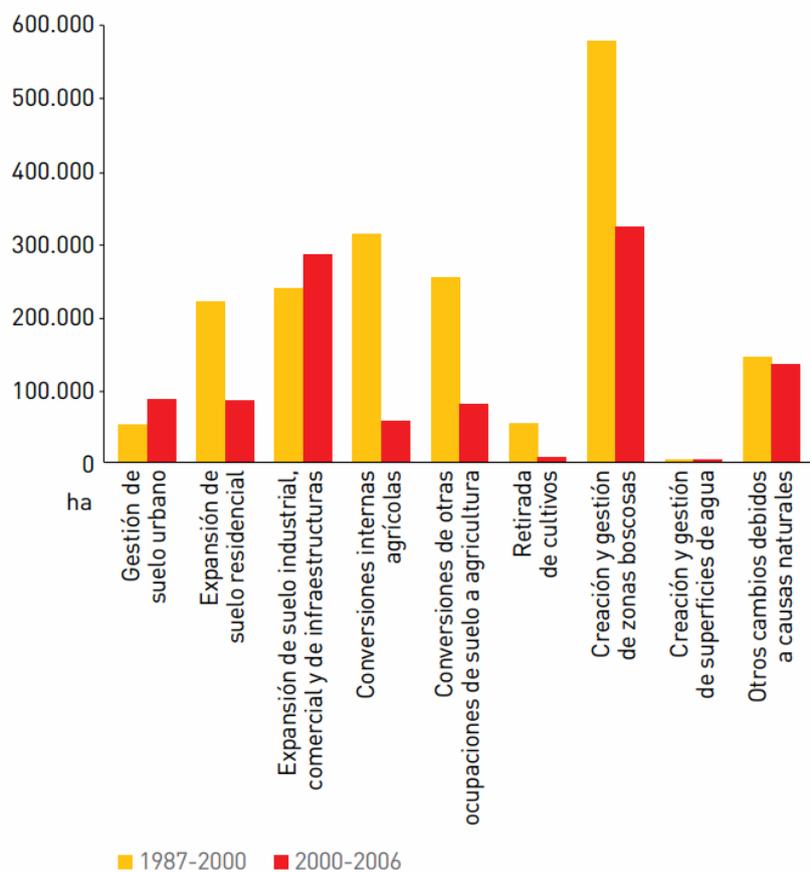


Figura 21. Flujos de intercambios principales en la franja costera de 10 km en España, 1987-2000-2006. Fuente: Observatorio de la Sostenibilidad en España, OSE.

A escala provincial se puede ver que las diez provincias que presentaron mayor crecimiento de zonas urbanas e infraestructuras se encuentran en la cuenca Mediterránea y en Canarias (Figura 22), destacando Canarias con más de 7000 Ha artificializadas en el período 2000-2006.



Figura 22. Evolución de la playa de Benidorm (1960-2005). Fuente: Ministerio de Medio Ambiente

La franja costera de los primeros 10 km delimita el área de mayor influencia de los procesos de artificialización, además de otras dinámicas costeras, del medio territorial y marino. Al considerar otras distancias, como 2 ó 5 km se observa en ciertas zonas que las urbanizaciones, infraestructuras, etc migran hacia el interior debido a la colmatación de esta primera franja, lo que a su vez es corroborado por la ocupación dispersa, incremento de vías de acceso y creación de campos de golf y servicios turísticos no solo en la franja inmediatamente limítrofe con el mar (Observatorio de la Sostenibilidad en España 2011).

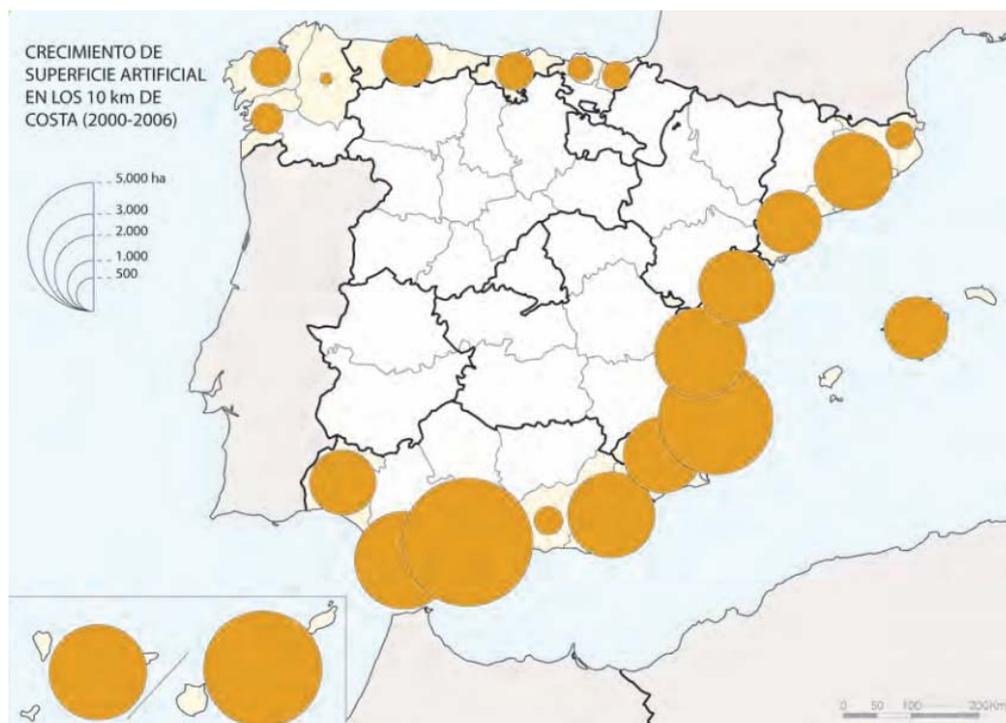


Figura 23. Crecimiento de superficie artificial en los 10 km de costa entre 2000 y 2006, por provincia.
Fuente: Observatorio de la Sostenibilidad en España, OSE.

Este cambio en los usos del suelo hacia un desarrollo urbanístico desmesurado en la costa es un fenómeno complejo y delicado en España. Su explicación puede deberse a varios fenómenos asociados, como la industria turística, la población jubilada y extranjeros, el boom inmobiliario, la ampliación de infraestructuras de comunicación y la compensación económica, pero hay que tener en cuenta que una simple intervención en cualquiera de ellos puede dar lugar a consecuencias serias en la costa.

El nivel y ritmo de artificialización en la franja de 10 km de costa en 2006 no es sostenible y, además, los impactos generados por un crecimiento descontrolado (en torno a 18 % en ambos períodos de 13 y 6 años) son muchas veces irreversibles. La crisis económica que atraviesa España desde 2007 está forzando una ralentización de este proceso, lo que se puede considerar una oportunidad para iniciar un proceso de planificación integrada de la costa española. Sin embargo, es evidente una seria falta de concienciación y de aplicación de los instrumentos de gestión existentes, por lo que sin este cambio no es posible impulsar mejores condiciones ambientales y conservar nuestro litoral.

4. ESCENARIOS PARA LA PROYECCIÓN DE IMPACTOS Y RIESGOS

4.1. Escenarios climáticos

Los cambios futuros en las variables climáticas mostrados hasta el momento proceden de estudios que consideran distintos escenarios de cambio climático. En este apartado, se definen unos escenarios, correspondientes a cambios en el clima, propuestos para llevar a cabo la evaluación del riesgo en la costa española frente al cambio climático.

El análisis del riesgo requiere, en primer lugar, la definición de la magnitud y secuencia temporal de la amenaza que se está considerando. Para ello se plantean dos tipos de aproximaciones: la determinación de ciertos niveles de aumento del nivel medio del mar global (NMMG) denominadas proyecciones (valores hipotéticos basados en la bibliografía existente) para un año horizonte y la extrapolación de la tendencia observada en las variables climáticas que afectan a la inundación (aumento del nivel del mar y cota de inundación) a un determinado año. En el primero de los casos el año horizonte es 2100, es decir, asumimos que a finales de siglo el nivel del mar habrá subido una cierta magnitud, pero no sabemos cómo lo ha hecho (su distribución temporal) a lo largo de este tiempo. En el segundo de los casos nuestro año horizonte es 2040 en el que obtenemos un valor del nivel del mar basado en la extrapolación de la tasa de crecimiento observada en los últimos 50 años. En este caso, además de en el año 2040 también podemos conocer cómo ha ido ascendiendo el nivel del mar hasta esa fecha.

Escenario C1: subida del NMMG de 50 cm a 2100

En este escenario se propone una subida del nivel medio del mar global de 50 cm, la cual está en el entorno de los valores medios de subida de nivel del mar propuestos en el escenario de emisión medio-bajo RCP4.5 (WGI, AR5) representativo de un cambio climático moderado. Utilizando las proyecciones regionalizadas propuestas en (Slangen et al. 2014), los valores de reajuste por isostasia glacial y la subsidencia natural del terreno se obtienen, a lo largo del litoral español, los valores regionalizados de subida del nivel del mar para el escenario C1.

Escenario C2: subida del NMMG de 85 cm a 2100

Este escenario contempla una subida del nivel medio del mar global de 85 cm, que está en la cola superior de la distribución de los valores propuestos en el escenario RCP8.5 (WGI, AR5), representativo de un cambio climático elevado. Regionalizando los valores globales e introduciendo las correcciones por isostasia glacial y subsidencia obtenemos en cada punto los valores regionalizados de subida de nivel del mar.

Escenario C3: subida del NMMG de 2 m a 2100

Al igual que en los dos escenarios anteriores, en este caso solo se contempla un cambio futuro en las variables climáticas, lo cual da lugar a cambios en el nivel del mar. Este es el escenario más pesimista y conservador de los propuestos, basado en modelos semiempíricos (Rahmstorf 2007) y en una cota superior de subida del nivel del mar. El hecho de considerar este escenario es debido a que existen nuevas preocupaciones acerca de la estabilidad de las placas de hielo de Groenlandia y la Antártida occidental, de forma que su deshielo puede dar lugar a la principal fuente de subida del nivel del mar, superándose de forma plausible 1 m de ascenso. Aunque la ocurrencia de este escenario es baja, las fatales consecuencias a las que puede dar lugar hacen que no deba descartarse. Como en los dos escenarios anteriores los valores de subida del nivel del mar utilizados en el cálculo estarán regionalizados a lo largo de todo el litoral.

Escenario C4: extrapolación histórica de la tendencia de largo plazo de la variable a 2040

Por último, se plantea un cuarto escenario que contempla cambios futuros en las variables climáticas en el corto-medio plazo (primera mitad del siglo XXI). La estimación de los cambios en la inundación está basada en la extrapolación histórica de la tendencia de largo plazo observada en la variable cota de inundación. Con el objetivo de ilustrar este tipo de aproximación se presenta en la Figura 24 un ejemplo de extrapolación de la tendencia observada de aumento de nivel del mar en los últimos 60 años al año 2040.

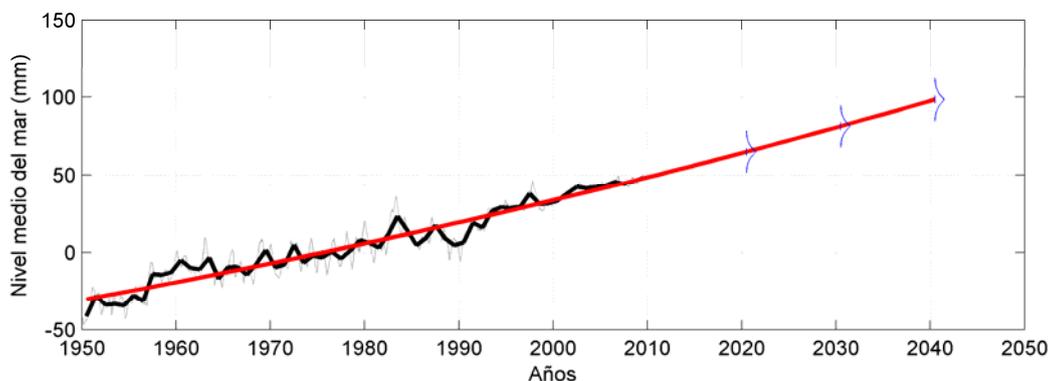


Figura 24. Ejemplo de extrapolación de la tendencia de aumento de nivel del mar al año 2040. La referencia (valor del nivel del mar igual a 0) está situada en el valor medio del nivel del mar en el período 1960-1990. Fuente: IH Cantabria.

4.2. Escenarios no climáticos: cambios en la vulnerabilidad

El término vulnerabilidad hace referencia a las condiciones y características de los elementos de la costa afectados por los impactos de cambio climático, que pueden implicar una mayor o menor afección al sistema. La vulnerabilidad está, por tanto, determinada por factores principalmente ambientales, sociales, económicos y administrativos.

El grado de vulnerabilidad de un sistema tiene que ver con su sensibilidad y su resiliencia. Estas dos cualidades normalmente son intrínsecas y función de las características naturales del sistema. La sensibilidad es el grado de afección que puede generar la amenaza sobre el sistema y la resiliencia es la capacidad de un sistema para absorber el impacto y reorganizarse mientras experimenta un cambio con el fin de conservar la misma función, estructura e identidad (adaptado de Walker et al. 2004). La resiliencia, por lo tanto, implica una capacidad de adaptación natural, característica de los sistemas naturales, como por ejemplo los humedales. Ante la subida del nivel del mar el humedal es capaz de migrar hacia el interior colonizando nuevas zonas. Sin embargo, esta capacidad se puede ver reducida por el hombre al llevar a cabo actuaciones como el cambio en los usos del suelo o la rigidización de los límites del humedal mediante estructuras de hormigón.

En este estudio la vulnerabilidad se ha centrado esencialmente en el factor social, a través de la población, y el factor económico a través de ciertos indicadores como el Producto Interior Bruto (PIB) o la Renta Familiar Bruta Disponible (RFBD), mientras que el factor medioambiental se ha introducido a través de la valoración de los servicios ecosistémicos.

Se definen dos escenarios de vulnerabilidad, el primero de ellos contempla la situación actual del sistema socioeconómico y natural, mientras que el segundo considera el sistema socioeconómico futuro del año 2040, basado en la extrapolación de las tendencias observadas durante los últimos 30 años de algunos indicadores socioeconómicos.

Escenario V0: vulnerabilidad actual

Este escenario considera la vulnerabilidad del sistema natural en el momento actual, es decir, trabajamos con la valoración actual de los servicios ecosistémicos caracterizados a través de la base de datos VANE (Valoración de los Activos Naturales de España) descrita más ampliamente en el Capítulo 6.

En cuanto al sistema socioeconómico, este escenario considera la sociedad actual y mediante él vamos a estudiar cuáles serían las consecuencias si se ve sometida a los cambios pronosticados para el año 2100. Someteremos a evaluación el escenario al que se enfrentaría la sociedad presente si sufriera en este momento las condiciones derivadas del cambio climático a finales del siglo XXI, con lo que renunciamos a pronosticar cuál es la evolución social durante un siglo. A un horizonte de tiempo tan lejano, asumimos que

el resultado obtenido, por un lado, sería demasiado dependiente de nuestras hipótesis de funcionamiento y por tanto los pronósticos serían inestables, y por otro lado, alejaría el campo de discusión de la problemática climática que es el objeto de este trabajo.

Escenario V1: sociedad en el año 2040

Para la definición del escenario socioeconómico representativo de la sociedad afectada en el año 2040 se han elegido una serie de variables socioeconómicas que han sido reconstruidas al año 2040 utilizando las tendencias observadas más conservadoras. Las variables elegidas han sido la población, el Producto Interior Bruto (PIB), el Valor Añadido Bruto (VAB), la Renta Familiar Bruta Disponible (RFBD) y el stock de Capital.

Para determinar el escenario de evaluación a 40 años se ha realizado una revisión de las evidencias existentes desde los años sesenta a la actualidad. Los escenarios proyectivos propuestos están basados en la comparación de las tasas medias de crecimiento de las variables elegidas durante distintas ventanas de análisis: desde 1975, desde 1985, desde 1995, y desde el año 2000, a fin de calibrar un crecimiento plausible y razonable. En la calibración se ha tenido en cuenta la tasa mínima de crecimiento observada y se han descartado los crecimientos que podrían calificarse de excepcionales a la vista de la evolución observada.

- Para la población, las evidencias arrojan un crecimiento del 1,5% anual durante los últimos 10 años. Se ha estimado un crecimiento de la población en un 1%
- Para el PIB *per cápita* se han recogido desde 1991 datos entre 2% y 3,5% anual y se ha estimado 2,5%
- Para la Renta Disponible municipal se han observado crecimientos del 4% y se han estimado proyecciones al 2%
- Para el valor del stock de capital afectado se han estimado crecimientos a partir de los observados de 1990 a 2008 descartando valores extremos.

La Tabla 7 muestra las tasas de crecimiento obtenidas para cada uno de los indicadores estudiados y para cada región. Estos serán los valores utilizados a la hora de calcular las consecuencias sobre el sistema socioeconómico.

	Pontevedra	Coruña	Lugo	Asturias	Cantabria	Vizcaya	Guipuzcoa	
Población	0	+1.5	0	0	0	0	0	
PIB _{pc}	+1.5	0	+1.5	+1.5	+1.25	+1.5	+1.25	
VAB	Agricultura	0	0	0	0	0	0	
	Industrial	+3	+1	+1	+2.5	+3	+2	+3
	Servicios	+3	+3	+2	+3	+3	+3	+3
Stock de capital	Urbano	+2.5	+2.5	+2.5	+2.5	+2.5	+2.5	+1
	Agricultura	+2	+2.5	+2.5	+1.5	+1	+0.5	0
	Industrial	+4	+3	+3	+1	+1.5	+3	+2
	Infraestructuras	+2	+2	+2	+2	+2	+2	+2

Tabla 7. Tasas de crecimiento observadas (%) en los indicadores socioeconómicos estudiados para cada provincia de interés. Fuente: IH Cantabria

Los datos de población provienen de la base de datos de la Fundación BBVA que cuenta con una resolución espacial de 1 km² y están actualizados al censo de 2006. Los datos empleados para el PIB son *per cápita* y se han obtenido de la Contabilidad Regional de España (INE), al igual que los datos para la RFBD. Por último, los datos del VAB y de stock de capital provienen de la Fundación BBVA que proporciona información desagregada a escala provincial para los distintos tipos de stock. En concreto para este estudio nos hemos centrado en el VAB agrícola, industrial y de servicios y el stock de capital agrícola, viviendas e infraestructuras urbanas (suelo urbano), industrial e infraestructuras.

5. IMPACTOS EN ZONAS COSTERAS

Los efectos observados del cambio climático en las costas como son el aumento de la temperatura del mar, el aumento de la concentración de CO₂ y disminución de su pH, el aumento del nivel del mar o los cambios en los patrones de tormentas son los causantes de una serie de impactos costeros.

Algunos de los impactos costeros observados en el último siglo han sido: el retroceso de los arenales, aumento de la erosión en acantilados, cambios en la vegetación costera y zonificación de especies, pérdida de humedales o alteración de las praderas submarinas.

El cambio climático también está contribuyendo a los impactos sobre los sistemas socioeconómicos: contaminación de acuíferos y aguas superficiales que sirven como recurso de agua dulce, intrusión salina en los estuarios y sistemas ribereños costeros afectando a tierras de cultivo, mayores niveles de inundación costera o la degradación de recursos potenciales para el turismo como los arrecifes de coral o las playas.

Algunos de los principales impactos del litoral español son la inundación costera, la erosión y la intrusión salina. La tasa de aumento de la inundación observada en los últimos años prevé un aumento de la inundación del 8 % respecto a los niveles actuales en el Cantábrico.

La pérdida de playa (y en consecuencia de hábitat) debido a la subida del nivel del mar puede deberse fundamentalmente a los impactos de inundación y erosión. Las provincias que experimentarán un mayor aumento de la cota de inundación en playas para los escenarios estudiados serán las del Mediterráneo y Canarias, especialmente las de la zona del Mar de Alborán.

Los cambios en la tasa de erosión costera pueden ser originados por el aumento del nivel del mar o por el cambio en la dirección media del oleaje. Además, cambios en el transporte de sedimentos también potenciarán las zonas de erosión o acreción.

La subida del nivel del mar o la disminución de caudales de agua dulce debido a sequías o alteración del régimen de precipitaciones producirá un mayor avance de la cuña salina, aumentando la salinidad de las aguas de ríos o acuíferos, pudiendo llegar a producir su contaminación. Este impacto del cambio climático tiene especial relevancia en el Delta del Ebro, donde el equilibrio de la cuña salina es fundamental para la supervivencia de su fauna y flora y las condiciones de explotación agrícola a través de los campos de arroz.

5.1. Impactos observados en la costa española

A la vista de los impactos sobre los sistemas natural y socioeconómico descritos en la sección anterior se han identificado una serie de impactos potenciales de cambio climático en la costa española. La combinación del aumento del nivel del mar y los cambios en los eventos extremos dan lugar a los riesgos de inundación en zonas bajas y la aceleración de la erosión costera, los cuales son temas especialmente preocupantes en todo el litoral español. La intrusión salina es también un impacto importante desde el punto de vista natural y socioeconómico, de cara a la salinización de terrenos dedicados a la agricultura.

En este primer análisis, la escala nacional del estudio implica el uso de modelos sencillos en la caracterización de los impactos, de forma que lo que se identifiquen sean zonas susceptibles de sufrir un determinado impacto potencial de cambio climático como por ejemplo la inundación. Así, estos impactos se han estudiado de manera sencilla teniendo en cuenta únicamente las características de la amenaza climática (por ejemplo subida de nivel del mar, marea meteorológica, oleaje, etc) y obviando la exposición de la costa (sin tener en cuenta las características físicas de la costa). De esta forma, en el caso de que el impacto haya ocurrido realmente en esa zona se podrá vincular su ocurrencia a la variabilidad climática natural o al cambio climático, puesto que se han observado cambios en el generador principal del impacto. Así, por ejemplo, si se ha observado erosión en la playa del Trabucador en el Delta del Ebro ésta se podría explicar como consecuencia de la subida del nivel del mar regional y del cambio en la dirección media del oleaje. Una vez localizadas esas zonas sería conveniente llevar a cabo estudios de detalle, donde el impacto se caracterice mediante modelos de impacto más sofisticados que tengan en cuenta las amenazas a alta resolución y una buena definición de la exposición.

5.1.1. Inundación

Normalmente hablamos de inundación en la costa cuando se supera un determinado nivel al que llegan habitualmente las aguas y se generan daños, bien en el sistema natural o en el sistema socioeconómico. Esto responde a eventos extremos de inundación que ocurren aleatoriamente debido a la interacción de varios factores, tras los cuales el nivel de las aguas vuelve a su situación media. Sin embargo, la subida del nivel del mar debido al cambio climático supone la inundación permanente de zonas bajas de la costa, quedando ciertas áreas del litoral anegadas y perdiendo su uso y disfrute. Por tanto, se pueden distinguir dos tipos de inundación costera: la inundación permanente debido a la subida del nivel del mar y la inundación potencial debida a eventos extremos.

La inundación permanente responderá a la pérdida de terrenos (especialmente zonas bajas de la costa) para los distintos escenarios de cambio climático. Tradicionalmente, la costa ha sido gestionada asumiendo un nivel medio del mar constante pero, hoy en día,

la subida del nivel del mar y el riesgo de inundación permanente exigen la incorporación de esta información a los planes de gestión.

Por otro lado, el aumento del nivel del mar también repercute en los eventos extremos de inundación incrementando su frecuencia. Los eventos de inundación son un fenómeno aleatorio complejo y una de las consecuencias de que sea así es que no existe un límite determinista que se alcanza durante el peor temporal, sino que cada nivel tendrá una probabilidad de ser sobrepasado. Por lo tanto, los eventos de inundación pueden variar en su frecuencia e intensidad y su estudio se lleva a cabo mediante un tratamiento estadístico. La frecuencia está ligada al período de retorno del evento, por ejemplo, el nivel de inundación asociado a 100 años de período de retorno es aquel que, por término medio, ocurre una vez cada 100 años. La intensidad o magnitud del evento se refiere a la cota que alcanzan las aguas en el evento de inundación. Una menor frecuencia del evento supone mayor inundación.

El régimen de inundación por acción de la dinámica marina y meteorológica en un tramo de costa específico es un fenómeno complejo, ya que en él intervienen un gran número de elementos. Sin tener en cuenta factores locales procedentes de tierra en dominios semi-cerrados (interior de bahías, riberas de ríos, etc), el fenómeno de inundación costera se define como la acción de dos agentes: el nivel del mar y, sobre dicho nivel, la acción del oleaje. A su vez, el nivel del mar está constituido por tres variables: el nivel medio del mar, la marea astronómica y el residuo meteorológico. La Figura 25 en su parte izquierda muestra un esquema explicativo de la cota de inundación con la superposición de sus componentes. En la parte derecha se muestra una serie temporal de cota de inundación en Santander y un zoom de una ventana de tiempo en la que se representan por separado todas las componentes tenidas en cuenta: nivel de referencia a Alicante, nivel medio del mar, marea astronómica, marea meteorológica y sobreelevación debida al oleaje.

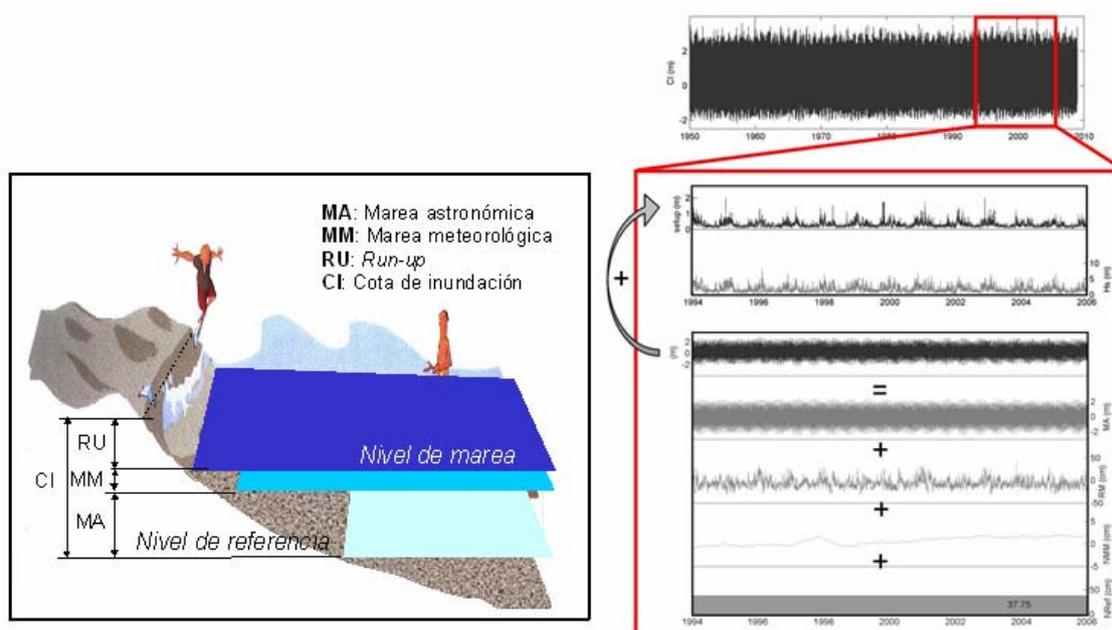


Figura 25. Esquema de la cota de inundación y sus componentes (izquierda) y serie temporal de cota de inundación y sus componentes en Santander. Fuente: IH Cantabria.

El nivel medio del mar se define como el valor promedio de la superficie del océano durante un periodo de tiempo respecto a un nivel de referencia. En la costa peninsular el nivel de referencia establecido es el cero de Alicante, mientras que en los archipiélagos balear y canario el nivel medio está referido al nivel del mar local. Ya hemos visto en el Capítulo 3 que el nivel medio del mar está ascendiendo a nivel global, pero a nivel regional o local puede presentar distinto comportamiento.

La marea astronómica es una oscilación del nivel del mar de carácter determinista cuyo período de oscilación varía entre las 12 horas y los 19 años. Las mareas altas, que presentan oscilaciones diarias, equinocciales, interanuales y decadales, contribuyen a la ocurrencia de niveles del mar extremos (Pugh, 1987). Contrariamente a lo que pudiera parecer, la marea astronómica juega un papel de "laminación" de los eventos extraordinarios de inundación costera, puesto que la coincidencia de un evento de oleaje y marea meteorológica extremos con una marea viva equinoccial tiene un período de ocurrencia alto. La magnitud de la marea a lo largo del litoral español es muy variable, alcanzando valores en el Cantábrico y Galicia superiores a 4 metros, mientras que, en el Mediterráneo es de pocos centímetros (Figura 26).

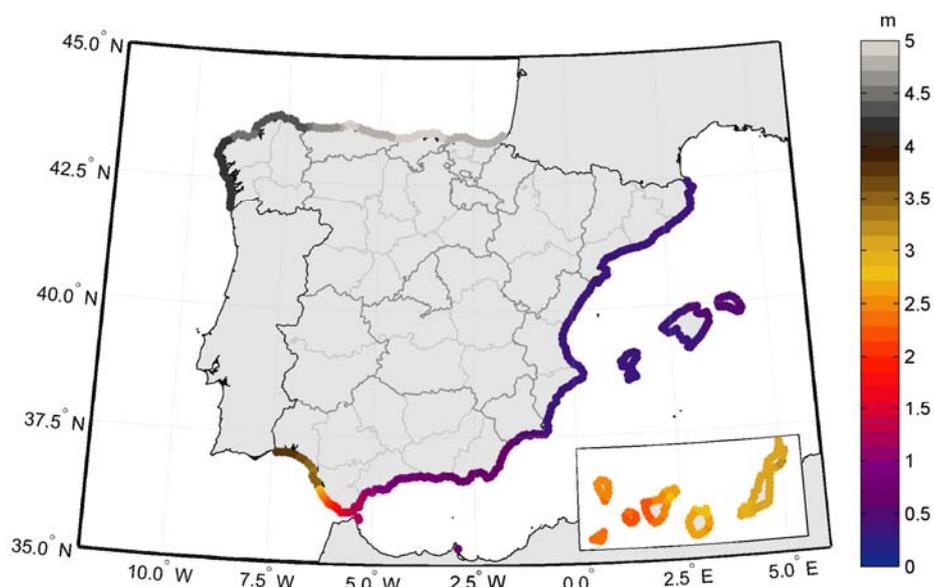


Figura 26. Rango de marea astronómica a lo largo del litoral español. Fuente: IH Cantabria

El residuo meteorológico es una oscilación del nivel del mar debido a la acción conjunta de la variación de presión atmosférica y el arrastre del viento, y su período puede ser desde varios minutos a días. Las bajas presiones atmosféricas asociadas al paso de las borrascas generan un ascenso del nivel del mar asociado a la depresión barométrica de las mismas. Las grandes borrascas extra-tropicales que afectan al litoral español, generan, de modo habitual, sobreelevaciones superiores a 15 cm, y pueden llegar a generar sobreelevaciones en torno al metro. El viento, por su capacidad de arrastrar agua, es otro factor que puede dar lugar a la sobreelevación del nivel del mar en la costa. Para que la acción del viento genere una elevación del nivel del mar deben darse vientos intensos, determinadas condiciones de geometría de la costa y poco calado. En España se producen eventos de marea meteorológica importantes. Este es el caso del conocido temporal de Noviembre de 2001 que afectó a las costas catalanas, balear y valenciana debido a la acción conjunta del residuo meteorológico y el oleaje. Como se ha visto, los posibles cambios en los patrones de tormenta y del nivel medio del mar debidos al efecto del calentamiento global podrían afectar al residuo meteorológico local modificando los niveles del mar extremos.

El oleaje, generado por la acción del viento sobre la superficie del mar, es una oscilación del mar con períodos entre 3 y 30 segundos. El oleaje es la oscilación del mar más relevante en términos de erosión litoral y se manifiesta como un ascenso de la masa de agua en la costa denominado *run-up*. El *run-up* del oleaje (RU) es la cota que alcanza el oleaje al incidir sobre un elemento respecto al nivel del mar en reposo. Este fenómeno se produce después de que la ola rompa debido a su iteración con el fondo, produciéndose el movimiento hacia delante de la masa de agua hasta que la energía de la ola que no ha sido disipada en el proceso de rotura se invierte en subir por un talud.

Dependiendo del tipo de costa las olas ascenderán más o menos por el talud. Si tenemos una playa tendida, la masa de agua alcanzará menos cota que si lo que hay es un dique vertical o un acantilado, donde el *run up* que se produzca será mucho más elevado. A partir de formulaciones diferentes podemos estudiar la cota de inundación para estas dos tipologías de costa, estudiando los cambios observados en los últimos años y, a partir de la tendencia, obtener el cambio esperado para un año horizonte.

Con el objetivo de poder comparar distintas zonas de la costa española e identificar áreas especialmente susceptibles a inundación, el análisis preliminar realizado tiene en cuenta esencialmente la definición de la amenaza, mientras que con respecto a la exposición se asume una única tipología para toda la costa. En el primero de los supuestos vamos a estudiar la cota de inundación para el caso de costa acantilada o artificializada mediante estructuras tipo dique o paseo marítimo. La cota de inundación asociada a 50 años de período de retorno alcanza los 4,5 m en el Mar Cantábrico y Galicia mientras que en el Golfo de Cádiz varía desde los 3 m en la zona de Huelva, disminuyendo hasta los 1,5-2 m en el Estrecho de Gibraltar. El litoral Mediterráneo español muestra valores de cota de inundación mucho más bajos que están en el entorno de los 0,5-1 m, salvo en la Costa Brava donde se llegan a los 1,5 m (Figura 27).

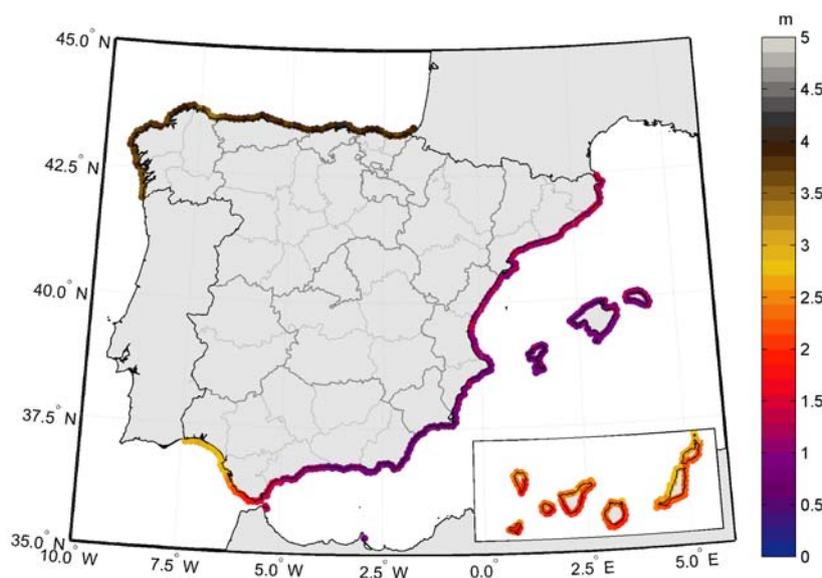


Figura 27. Cota de inundación asociada a 50 años de período de retorno basado en datos históricos.
Fuente: IH Cantabria.

Tal y como se ha visto, las playas son uno de los ecosistemas más abundantes de la costa española y, además de suponer un importante valor ecológico, constituyen un recurso turístico de vital importancia para la economía del entorno. Desde el punto de vista del interés socioeconómico, las playas, junto con los sistemas dunares y bajos mareales proporcionan una amplia zona de amortiguación para los hábitats costeros naturales y los desarrollos urbanos gracias a su función de regulación, control de la

erosión y protección costera. Además las playas proporcionan importantes servicios como la filtración de grandes volúmenes de agua de mar y la eliminación y renovación de nutrientes, contaminantes y desechos del sistema (McLachlan y Brown 2006).

Desde el punto de vista ecológico, las playas dan cobijo a cientos de especies. Las de mayor tamaño y movilidad pasan solo una parte de su tiempo en la playa alimentándose o anidando (peces o aves), mientras que las que viven permanentemente allí están muy adaptadas a un ambiente dinámico, tienden a ser pequeñas y se encuentran enterradas en la arena: microbios, algas microscópicas e invertebrados (nematodos, crustáceos, poliquetos y moluscos). La abundancia y productividad de estos organismos disminuye con el tamaño de grano, mientras que la biomasa sigue la tendencia contraria. En general, la riqueza y abundancia de estas comunidades depende de una combinación de parámetros físicos como son la latitud (que confiere unas determinadas condiciones climáticas a la zona), rango de marea, tamaño de grano de la arena y pendiente de la playa. En el caso de suponer que el tipo de costa es playa disipativa (es decir, playa con pendiente muy suave) la cota de inundación alcanza una mayor elevación (Figura 28). El cuantil asociado a 50 años de período de retorno alcanza elevaciones de hasta 8,5 m en el Mar Cantábrico y Galicia y 4 m en el Golfo de Cádiz y hasta 5,5 en la costa noroeste de la isla de Fuerteventura. En la cuenca Mediterránea y la cara sureste de las Islas Canarias la cota de inundación ronda los 2,5-3 m.



Figura 28. Cota de inundación en playas disipativas asociada a 50 años de período de retorno basado en datos históricos. Fuente: IH Cantabria

5.1.2. Intrusión salina

La intrusión salina es un proceso dinámico por el que el agua salada avanza tierra adentro en ríos y acuíferos costeros estableciéndose un equilibrio entre el agua dulce que

descarga el río y la cuña de agua salada que penetra en él. Los factores naturales reguladores de este proceso son, fundamentalmente, la descarga de agua dulce que tiende a mantener la estratificación frente al agua salina y el nivel del mar a través de la marea, que tiende a producir el mezclado turbulento de ambas masas y romper así la estratificación.

Este equilibrio alcanzado en estuarios, deltas y acuíferos es, sin embargo, susceptible de ser roto ante efectos del cambio climático como la subida del nivel del mar o la disminución de caudales de agua dulce debido a sequías o alteración del régimen de precipitaciones. En ambos casos, se produciría un mayor avance de la cuña salina aumentando la salinidad de las aguas del río o acuífero, pudiendo llegar a producir la salinización en acuíferos costeros. Además de los efectos del cambio climático, la acción humana también ha contribuido y contribuye a la alteración de la cuña salina. La extracción masiva de agua de los acuíferos costeros, la regulación del caudal de los ríos mediante embalses o trasvases y la construcción de presas que limitan el caudal sólido del río produce la alteración del equilibrio agua dulce/agua salada.

El problema de la intrusión salina es especialmente relevante en el Delta del Ebro, donde este equilibrio natural es fundamental para la conservación de los ecosistemas, pero también para mantener las condiciones necesarias para el cultivo de arroz, el principal uso económico del Delta. Los estudios ambientales del Plan Hidrológico Nacional (PHN) del año 2000 indican que la geometría de la cuña salina depende de la morfología del cauce, el caudal circulante y el nivel del mar. Sin embargo, en el Delta del Ebro, al ser pequeñas las sobreelevaciones del nivel medio del mar provocadas por las mareas (del orden de 20 cm) y muy puntuales las provocadas por otras causas como vientos persistentes y cambios de presión, el régimen dinámico de la cuña viene controlado principalmente por el caudal del río y la morfología del cauce. La longitud de la cuña salina es un parámetro que se obtiene midiendo sobre el eje longitudinal del río la distancia horizontal entre la desembocadura y la zona en donde la densidad es sensiblemente parecida a la del agua dulce. A medida que el caudal fluvial disminuye la longitud de la cuña aumenta. Así, cuando el flujo del río es inferior a 100 m³/s la cuña salina llega más o menos 32 Km tierra adentro de la desembocadura y con caudales entre 100 y 300 m³/s la cuña puede llegar a la isla de Gracia. Otras medidas afirman que cuando el caudal es superior a 400-600 m³/s la cuña desaparece. Esta dispersión tan grande en el rango de caudales es debido a la elevada dificultad en la medición y/o estimación de la longitud de la cuña. A partir de medidas puntuales de la cuña salina (Guillén y Palanqués 1992, Ibáñez et al. 1997 y el Proyecto PIONEER 2001) se ha podido obtener la evolución longitudinal de la posición de la cuña para cada caudal, observándose como retrocede la cuña hasta desaparecer cuando el caudal es de más de 600 m³/s (Cambio Climático en el Delta del Ebro, 2009). Además, reproduciendo la serie temporal de posición de la cuña salina a partir de los datos de caudal del río (datos procedentes de la estación E-27 de Tortosa desde el año hidrológico 1979-80 hasta 2003-2004), se ha podido obtener un régimen medio (la probabilidad asociada a cada posición de la cuña salina) en la situación actual, observándose que durante un 10% del tiempo en el año medio no va a existir cuña salina y que ésta sobrepasa la Isla de Gracia alrededor de un 20% del tiempo al año.

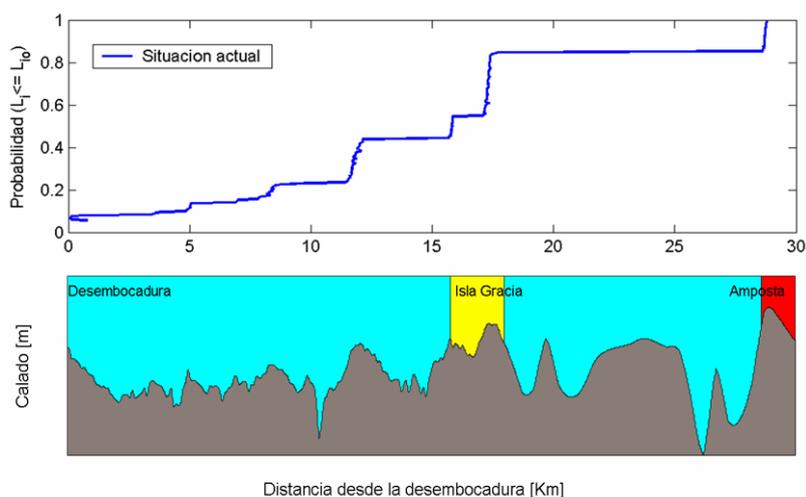


Figura 29. Régimen medio de avance de cuña salina en el Delta del Ebro para la situación actual. Fuente: Cambio Climático en el Delta del Ebro 2009.

5.2. Impactos proyectados en la costa española

El análisis de las observaciones de los impactos costeros en los últimos años permite arrojar luz sobre las características, ocurrencia y tendencias de éstos. Sin embargo, en un contexto de cambios en el clima es también muy ilustrativo y valioso el estudio de cómo serán estos impactos bajo distintos escenarios de cambio climático. Es decir, como evolucionarán los impactos a cierto año horizonte bajo cambios hipotéticos en las variables climáticas generadoras del impacto, como por ejemplo el aumento del nivel del mar o aumento de la temperatura superficial del agua del mar. Además, los cambios en el clima pueden dar lugar a nuevos impactos como, por ejemplo, la pérdida de fiabilidad y operatividad de obras marítimas, las cuales fueron diseñadas para unas condiciones de oleaje, viento y nivel del mar determinadas, o la pérdida de ecosistemas como la *Posidonia oceanica*.

De nuevo, aplicando los mismos modelos sencillos que en el apartado anterior, podemos identificar zonas susceptibles de sufrir inundación o erosión en un año futuro con ciertas condiciones climáticas, que en este caso se corresponderán con los escenarios propuestos en el apartado 4.1. El estudio espacial a lo largo de todo el litoral español se centra principalmente en los impactos de inundación y erosión en playas, así como en la pérdida de fiabilidad y operatividad en obras costeras debido a la importancia económica de los puertos en nuestro país.

Además, debido a la importancia ambiental (y socioeconómica), también se resumen los resultados obtenidos en estudios realizados sobre los cambios en la cuña salina en el Delta del Ebro y la pérdida de *Posidonia oceanica* en el entorno Balear, al ser éste un ecosistema endémico del Mediterráneo de un valor ecológico incalculable.

5.2.1. Inundación y retroceso de la costa

Si la tendencia de aumento en la cota de inundación observada en los últimos años continúa así, ¿cuál será el impacto de inundación sobre diques, estructuras costeras artificiales o acantilados (es decir, sobre una tipología de costa rígida) en 30 años?, ¿se identificarán nuevas zonas susceptibles de sufrir inundación costera? Asumiendo que la tendencia registrada en los últimos años va a continuar así durante la primera mitad del siglo XXI se pueden estimar cambios en la cota de inundación que prevén un aumento del 8 % en la fachada norte de la costa española y el Mar de Alborán para el año 2040 (lo que supone en torno a 20 cm más de cota de inundación). El sur-sureste de las Islas Canarias muestran aumentos en torno al 6 % y el Golfo de Cádiz y resto del litoral Mediterráneo presenta aumentos en torno al 2-3 % para el año 2040 (Figura 30).

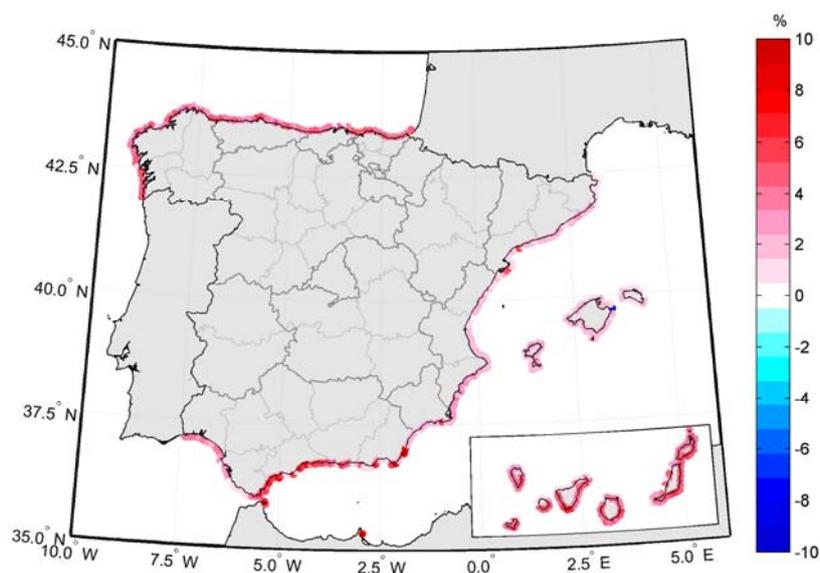


Figura 30. Porcentaje de cambio en la cota de inundación para el año 2040. Fuente: IH Cantabria.

Los cambios observados en los eventos extremos de inundación pueden referirse también a su frecuencia de ocurrencia. La inundación que antes ocurría una vez cada 50 años por término medio ocurrirá ahora más a menudo como consecuencia de la subida del nivel del mar y el cambio en la frecuencia y trayectoria de las tormentas. Extrapolando las tendencias observadas en la cota de inundación a lo largo de los últimos años podemos inferir tanto cambios en la magnitud como cambios en la frecuencia de ocurrencia. Para ilustrar este hecho se muestra cómo varía la magnitud y el período de retorno en la cota de inundación que en la actualidad se corresponde con 50 años de período de retorno (CI_{50}) en Bilbao y Barcelona (Figura 31). En ambos casos se puede ver que la intensidad de los eventos de inundación no aumenta mucho, en Bilbao la CI_{50} pasa de 3,85 m en el año 2010 a 4 m en el año 2040, mientras que en Barcelona el cambio en magnitud es prácticamente inexistente. Sin embargo, el cambio en la frecuencia con que ocurrirán los eventos es mucho más evidente. En Bilbao, la cota de inundación de 3,85 m pasará de ocurrir una vez cada 50 años, por término medio, a ocurrir una vez cada 15 en el año 2040, es decir, será mucho más probable alcanzar esa

cota de inundación. En Barcelona el cambio en la ocurrencia de los eventos es más moderado, pasando de ocurrir, un nivel de inundación de 1,1 m, una vez cada 50 años a una vez cada 40 años en 2040.

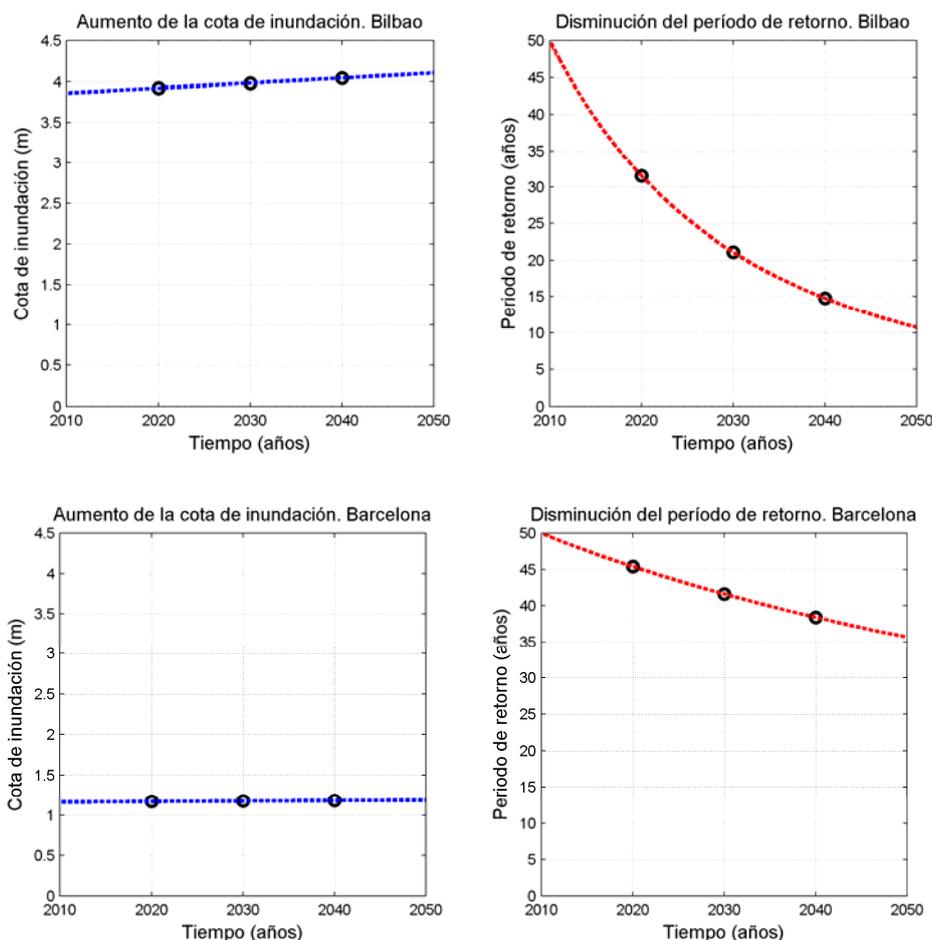


Figura 31. Variación en la intensidad de la cota de inundación correspondiente a 50 años de período de retorno en la actualidad (paneles izquierdos) y variación del período de retorno correspondiente a la cota de inundación en la actualidad (paneles derechos) a lo largo de la primera mitad del siglo XXI en Bilbao y Barcelona.

En cuanto a las playas, la alteración de sus características morfoodinámicas debido a los impactos del cambio climático repercute en la distribución y riqueza de los organismos y especies que viven en la playa. La subida del nivel del mar produce un aumento en la inundación y erosión de las playas, que se traduce en pérdida y fragmentación de hábitats, fundamentalmente en las zonas sometidas a desarrollos urbanos que impiden la adaptación natural de la playa. A medida que sube el mar, los primeros hábitats perdidos son aquellos que se encuentran por encima de la pleamar, dando lugar al detrimento de fauna de gran tamaño. Una vez se vayan perdiendo los hábitats, la fauna característica de la playa será reemplazada por aquella de las zonas intermareales y sustratos rocosos,

con el consecuente cambio en la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas. Además, la pérdida de playa (y su función como protección costera) dará lugar a una alteración en las dinámicas que en ella se desarrollan, la pendiente de equilibrio de la playa y el balance sedimentario, dando lugar nuevamente a pérdida de biodiversidad.

El aumento en la cota de inundación da lugar a cambios en los niveles de inundación, o a situaciones de inundación más frecuentes, las cuales son muchas veces catastróficas para la playa. A su vez, el aumento del nivel del mar y de los niveles de eventos extraordinarios de inundación producen la erosión de la berma de la playa dando lugar a un retroceso en el arenal. El cambio en la dirección de los oleajes dominantes origina también el cambio en la forma en planta de la playa, dando lugar a erosión en algunas zonas y acreción en otras. Para estudiar los cambios futuros en los impactos de inundación y erosión se han elegido como indicadores la cota de inundación y el retroceso de playa.

Si la tendencia observada en la cota de inundación en playas continuara a lo largo del siglo XXI ¿qué cambios en la inundación se esperan para el año 2040?, y ¿se identificarán nuevas zonas susceptibles? La Figura 32 izquierda muestra el valor de la cota de inundación en playas disipativas en el año 2040, mientras que el panel derecho muestra el porcentaje de cambio respecto a la situación actual (Figura 28). El cambio esperado para el año 2040 es menos pronunciado y homogéneo a lo largo de la costa que para el caso de tipología rígida, esperándose cambios en torno al 6 % sólo en algunos puntos del Cantábrico, al oeste del Mar de Alborán y sur de las Islas Canarias. La inundación extremal en el Golfo de Cádiz en playas alcanza valores de 4 m, pero el cambio relativo esperado para el año 2040 es muy pequeño (apenas se produce un aumento del 1 % en algunas zonas).

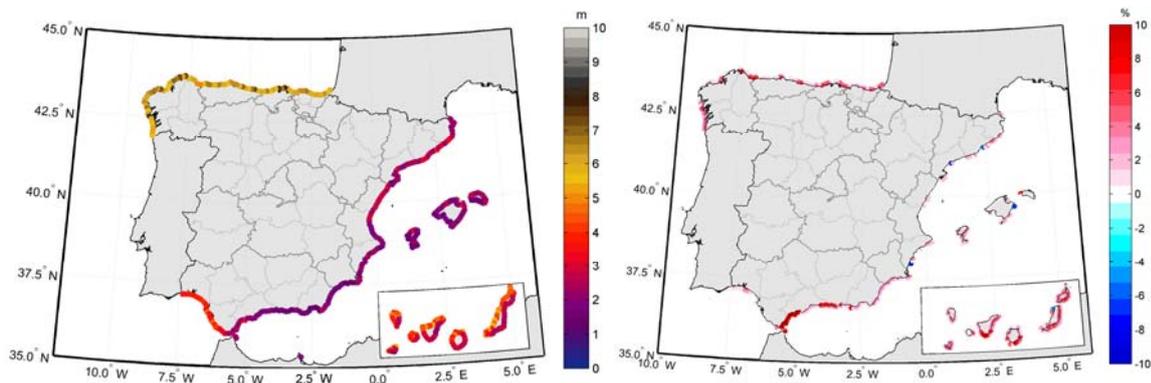


Figura 32. Cota de inundación asociada a 50 años de período de retorno en playas disipativas en el año 2040 (izquierda) y porcentaje de cambio en la cota de inundación respecto al siglo XX (derecha).

Fuente: IH Cantabria.

La extrapolación de la tendencia observada puede ser una aproximación válida para hacer una proyección a un horizonte de tiempo cercano. Sin embargo, también será

interesante estimar como serán los impactos proyectados a finales del siglo XXI. Para ello se plantean 3 escenarios de subida de nivel del mar de 0,5, 0,85 y 2 m. La Figura 33 muestra las proyecciones de cota de inundación en playas para cada uno de estos escenarios. Se puede ver que en los dos primeros casos la diferencia entre los escenarios es pequeña, mientras que en el caso de una subida del nivel del mar de 2 m la cota de inundación (cada 50 años) estimada para el Cantábrico estaría en torno a los 9 m, mientras que en el Golfo de Cádiz, donde la costa se caracteriza por zonas bajas estaría en torno a 6 m, lo que podría dar lugar a serias consecuencias.



Figura 33. Proyecciones de la cota de inundación asociada a 50 años de período de retorno para tres escenarios de subida de nivel del mar. Fuente: IH Cantabria.

Además de ver los resultados espacialmente también es interesante conocer los cambios en este indicador de impacto de manera agregada siguiendo, por ejemplo, un criterio administrativo como las provincias. La Figura 34 muestra la cota de inundación asociada a 50 años de período de retorno para los cuatro escenarios de cambio climático promediada por provincias. En este gráfico, además de los tres escenarios de subida de nivel del mar también se incluye el escenario de la extrapolación de las tendencias. De esta manera se ve que las provincias con mayor cota de inundación son las del Cantábrico (donde mayor es la carrera de marea y la intensidad de los oleajes incidentes) y se localiza el mayor cambio en el escenario 3, que supone una cota superior bastante conservadora de la subida del nivel del mar.

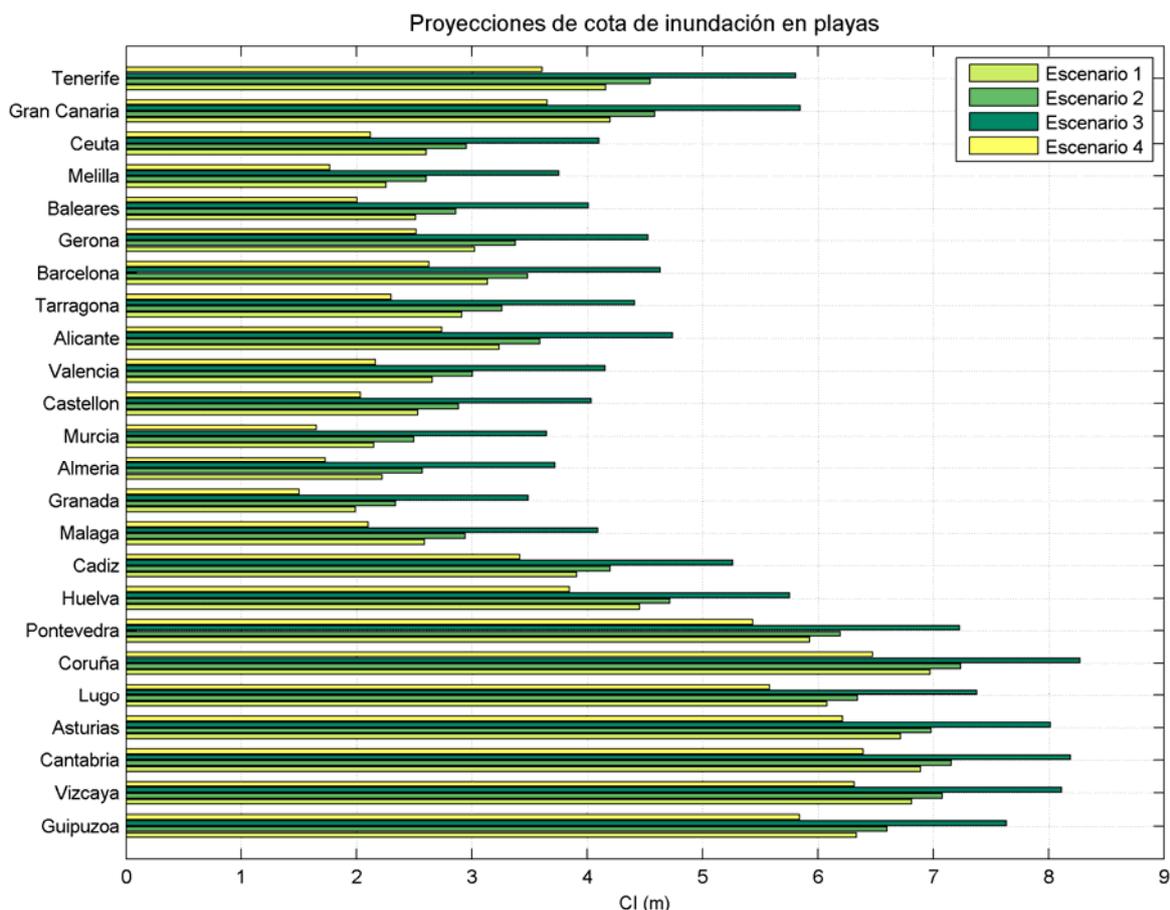


Figura 34. Cota de inundación asociada a 50 años de período de retorno para los distintos escenarios de cambio climático por provincias. Fuente: IH Cantabria.

Sin embargo, la información de este gráfico se completa con la de la Figura 35, donde se muestra el porcentaje de cambio que supone la futura cota de inundación respecto a la que había en el siglo XX por provincias y para cada escenario. En este caso se ve que el escenario 3 supone el mayor porcentaje de cambio en todos los casos, y que las provincias que experimentarán un mayor aumento de la cota de inundación serán las del Mediterráneo y Canarias, especialmente las de la zona del Mar de Alborán. En Granada, por ejemplo, la cota de inundación del escenario 1 supone un 32 % más de la CI_{50} que había en el siglo XX, y el 2 supone cambios de casi el 60 %. El escenario 3 es el que registra un mayor aumento, estimando la cota de inundación para el año 2100 en el 133 % de la observada en los últimos años. Almería y Murcia también experimentan un aumento de más del 100 % en la CI_{50} para finales del siglo XXI bajo el escenario de 2 m de subida del nivel del mar. En la comparativa de todos los escenarios se puede ver que el escenario 4 supone un aumento muy pequeño (prácticamente despreciable) en comparación con lo que suponen el resto.

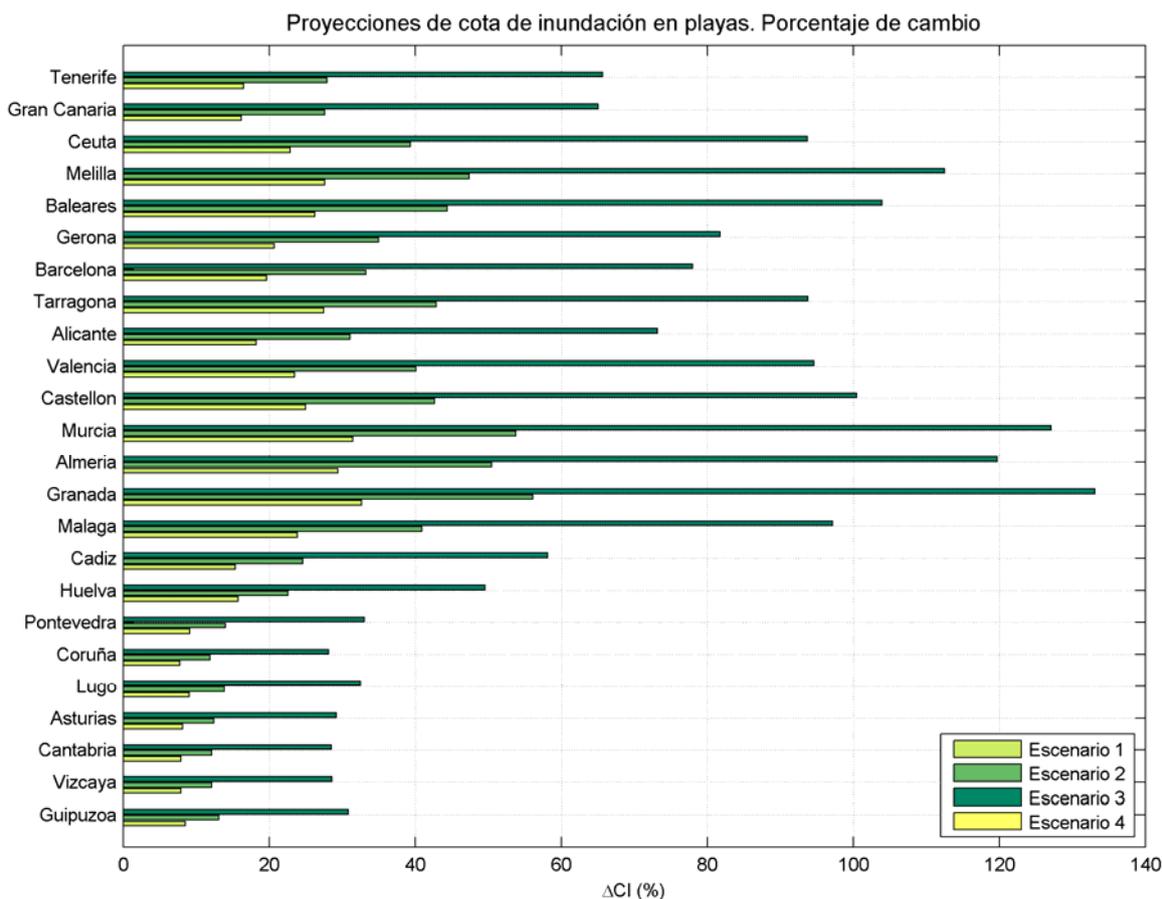


Figura 35. Porcentaje de cambio en la cota de inundación para los distintos escenarios de cambio climático por provincias. Fuente: IH Cantabria.

La línea de costa española se ha mantenido más o menos estable de forma natural durante los últimos siglos. Sin embargo, la artificialización desmesurada de la costa en las últimas décadas ha desencadenado la erosión de la costa en numerosas zonas. Las estructuras costeras como diques, espigones o paseos marítimos y el desarrollo urbanístico sobre complejos dunares que impiden el movimiento del sedimento a lo largo de la línea de costa, o simplemente cortan el transporte de sedimentos ha dado lugar a procesos erosivos acelerados como los que ocurren en la costa de Rota, al noroeste de Cádiz o en numerosas playas del Levante y la Costa del Sol.

El proceso de erosión o acreción en la costa dependerá fundamentalmente de los cambios en el nivel medio del mar, cambios en la dirección del oleaje y cambios en el transporte de sedimentos.

En condiciones de equilibrio, la forma en planta de una playa está gobernada por el balance en el transporte de sedimentos originado por el oleaje y el perfil está, generalmente, relacionado con el oleaje de la zona, la batimetría y el tamaño de grano del sedimento. La subida del nivel del mar y por lo tanto el cambio en la línea de costa

dará lugar a cambios en el clima marítimo y en el transporte de sedimentos. Esto modificará el perfil de playa forzando cambios en el transporte transversal de sedimento, desde el nuevo nivel del mar hasta la profundidad de cierre del perfil. La estimación de la tasa de retroceso de la playa es altamente incierta pues intervienen varios factores como el nivel del mar, la altura de la berma, el transporte de sedimentos y/o posibles aportes de sedimento provenientes de estuarios o ríos cercanos. En ausencia de toda esta información se ha decidido estimar el retroceso en las playas debido al efecto de los distintos factores por separado. En el caso de la subida del nivel del mar se ha utilizado para el cálculo la Ley de Bruun (Bruun, 1962). Esta formulación, aunque bastante simplificada, proporciona una indicación general del retroceso sufrido en una playa como consecuencia del ascenso del nivel del mar. La regla de Bruun se expresa como una relación en el ascenso del nivel del mar y la erosión en la playa. Esta relación permanece constante cuando el nivel del mar y la línea de costa se encuentran en equilibrio, y se encuentra en el rango de los 50-100 m de retroceso por cada metro de subida del nivel del mar. Asumiendo simplificaciones a lo largo de la costa (como mismo tamaño de grano en todo el litoral o berma de 1 m), con el objetivo de trabajar a escala nacional y poder comparar grandes áreas, obtenemos un retroceso de la línea de costa para el año 2040 en el entorno de 3 m en el litoral Cantábrico, Galicia y norte de las Islas Canarias. El Golfo de Cádiz sufrirá retrocesos de su línea de costa del orden de 2 m y el litoral Mediterráneo oscilará entre los 2 m de retroceso cerca del Estrecho de Gibraltar a 1,5 m en el resto de esta fachada (Figura 36).

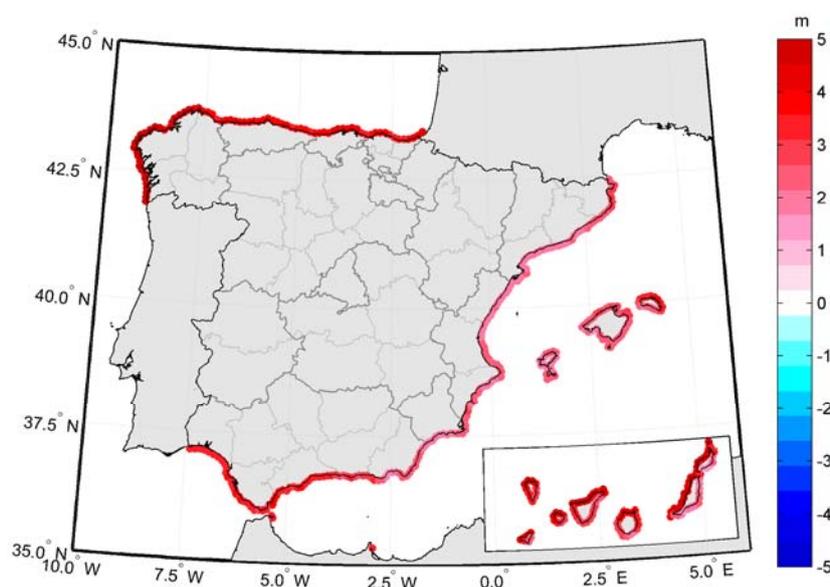


Figura 36. Retroceso en playas debido a la subida del nivel del mar en el año 2040. Fuente: IH Cantabria.

Los cambios en la dirección del flujo medio de energía del oleaje originarán también el retroceso en la línea de costa debido a los cambios en la planta de equilibrio de las playas. Sin embargo, debido a este factor, el retroceso en playas esperado para el año

2040 será de un orden de magnitud menor que el debido a la subida del nivel del mar. El sur de las Islas Canarias es la zona más afectada, con retrocesos en torno a 5 cm por metro lineal de playa (cm/ml). Algunas zonas del sur de Mallorca, la Costa Brava y el Delta del Ebro también sufrirán retrocesos en torno a los 3-4 cm/ml de playa (Figura 37).

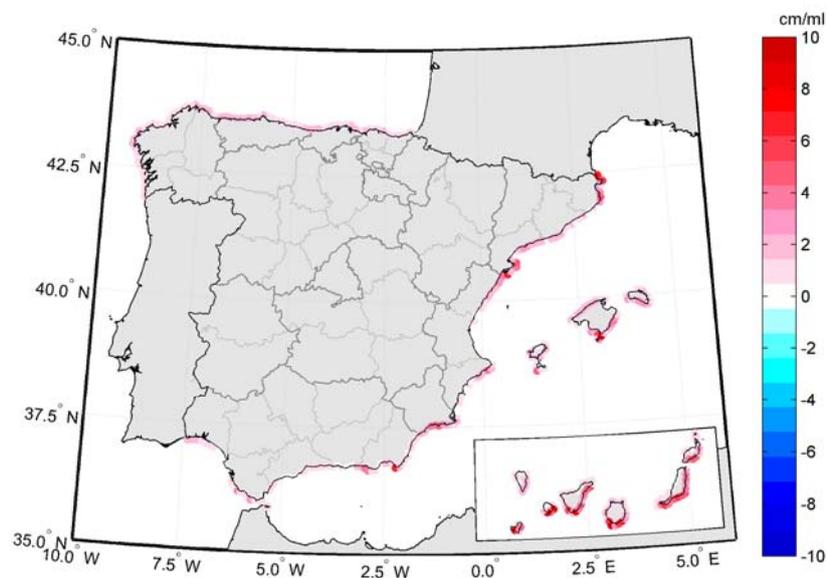


Figura 37. Retroceso en playas debido a cambios en la dirección del oleaje en el año 2040. Fuente: IH Cantabria.

Por último, los cambios en el transporte de sedimentos pueden dar lugar a acreción o erosión a lo largo de la costa. Este impacto se ha estimado utilizando la formulación del CERC (USACE, 1984). Los resultados para el año 2040 muestran incrementos en la erosión (entorno al 20 % más) en, prácticamente, toda la fachada cantábrica y algunos puntos de la costa de Cataluña, en el entorno del Delta del Ebro. En el Golfo de Cádiz y Mar de Alborán, así como la mayor parte del levante y las islas se estima un aumento en la acreción de sedimento, entorno a un 5-10 % más, dependiendo del sitio. Algunas zonas de Canarias y la Costa Brava presentan una tasa de aumento de la acreción de arena bastante mayor, entorno al 40 % (Figura 38).

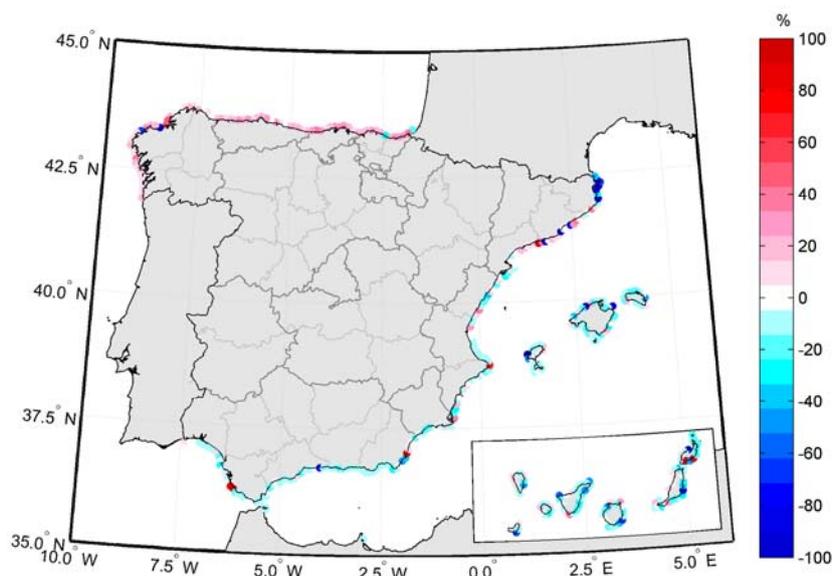


Figura 38. Porcentaje de cambio en el transporte de sedimentos (acreción/erosión) para el año 2040.
Fuente: IH Cantabria.

5.2.2. Cambio potencial de la intrusión salina

Ante cambios en el caudal del río como consecuencia de cambios en el régimen de precipitaciones debidos al cambio climático o el aumento del nivel del mar, ¿cómo cambiaría la cuña salina del Delta del Ebro?

En el proyecto Cambio Climático en el Delta del Ebro 2009 se estudió la influencia de la reducción del régimen de caudales y el aumento del nivel del mar en la cuña salina. Por un lado se plantearon dos escenarios de disminución de un 10 y un 20 % en el régimen de caudal del río en Tortosa a lo largo del siglo XXI. Ante estos dos supuestos, el régimen de longitud de la cuña salina se verá alterado, dando como resultado un mayor tiempo de permanencia de la cuña, más acusado cuanto mayor sea la detracción (Figura 39).

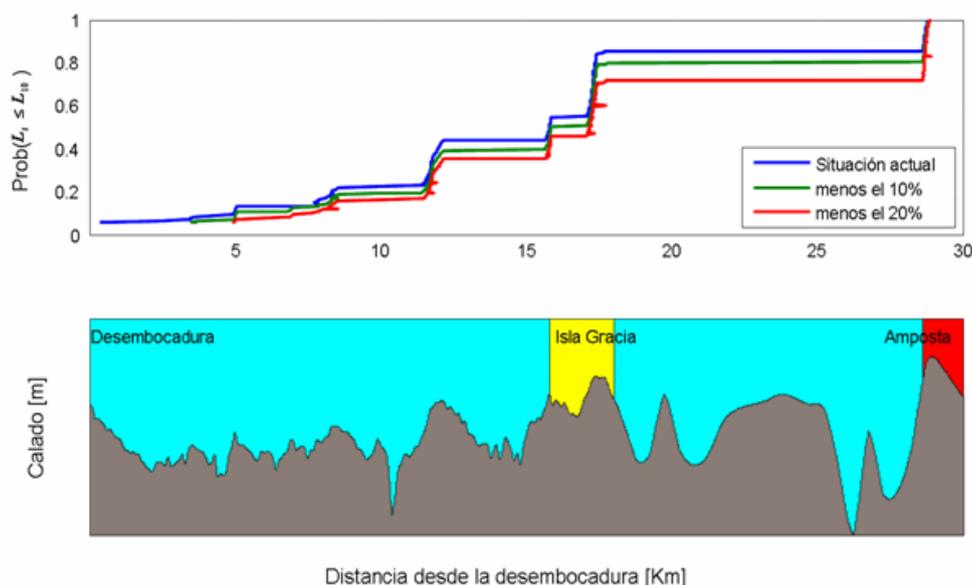


Figura 39. Régimen medio de cuña salina en el Delta del Ebro bajo distintos escenarios de cambio en el caudal del río. Fuente: Cambio Climático en el Delta del Ebro 2009.

Por otro lado se plantearon tres escenarios de aumento de nivel del mar propuestos en el AR4 (IPCC): un aumento de 15 cm para el año 2050 y 40 cm para el año 2100 (basados en el escenario A1B) y un tercer escenario más pesimista en el que se supone un aumento del nivel del mar de 100 cm en el año 2100. Ante estos supuestos se observa que el aumento del nivel medio del mar potencia la existencia de la cuña salina, en un área mayor y durante más tiempo. Para el escenario A1B de 2100 la cuña salina alcanza la Isla de Gracia en un 40% del tiempo y el escenario pesimista de A1B de 2100 indica que la cuña salina estará presente el 50% del tiempo en esta zona (Figura 40).

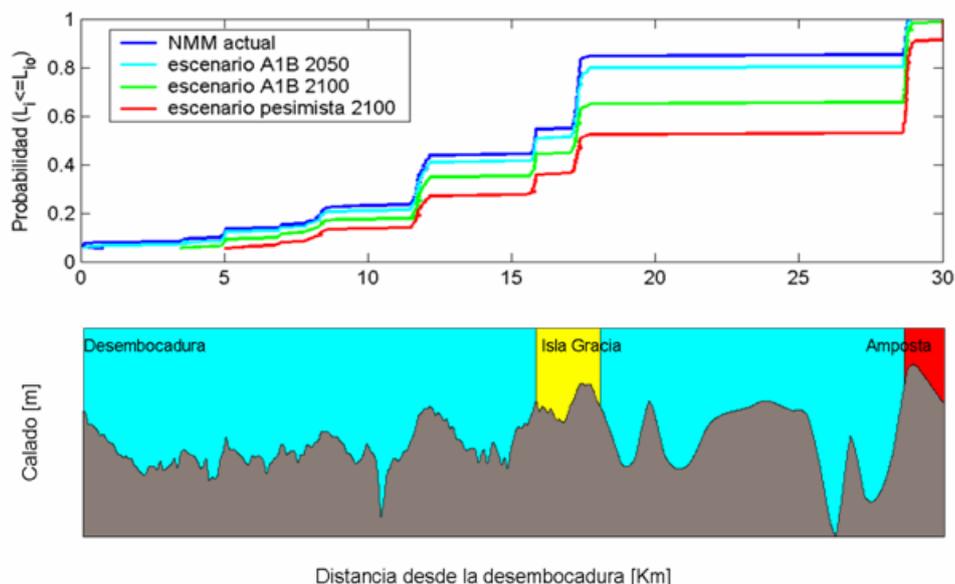


Figura 40. Régimen medio de cuña salina en el Delta del Ebro bajo distintos escenarios de aumento de nivel del mar. Fuente: Cambio Climático en el Delta del Ebro 2009.

6. CONSECUENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA ESPAÑOLA

El objetivo principal de este estudio es estimar las consecuencias sobre los sistemas natural y socioeconómico de la costa española, con el propósito de servir de base para el planteamiento y desarrollo de distintas medidas de adaptación.

Se han planteado 4 escenarios de cambio climático. Los tres primeros plantean una subida del nivel del mar regional para finales de siglo XXI (2100). El aumento del nivel del mar de los dos primeros está basado en los nuevos escenarios RCP (IPCC), mientras que el tercero se plantea como un escenario muy pesimista, poco probable pero factible. Por último, el cuarto escenario tiene como año horizonte 2040 y plantea la extrapolación de las tendencias observadas en el nivel del mar.

El impacto estudiado es la inundación costera, diferenciando entre la inundación permanente causada por la subida continuada del nivel del mar y los eventos catastróficos de inundación causados por eventos extremos.

La *Posidonia oceanica* es uno de los ecosistemas más sensibles y emblemáticos del Mediterráneo. Entre los importantes servicios naturales que proporciona destacan su capacidad de sumidero de CO₂, la protección costera frente a la erosión y su función de hábitat para especies protegidas y amenazadas. El principal factor de riesgo natural para la Posidonia es el aumento de la temperatura superficial del agua del mar como consecuencia del calentamiento global, pues al superarse los 28°C las tasas de mortalidad se disparan. Si el Mediterráneo occidental sufriera un aumento medio de 3,4±1,3°C a finales de siglo (escenario A1B) la densidad de las praderas de Posidonia disminuiría hasta alcanzar el 10% de la densidad actual a mediados de este siglo (2049±10 años).

Bajo los escenarios de cambio climático estudiados la pérdida principal de humedales se producirá en aquellos situados en el entorno de las ciudades o desarrollos urbanos, cuyos contornos han sido rigidizados impidiendo su adaptación. Este es el caso de la desembocadura del Nervión en Bilbao, la ría de Avilés o la ría de Ferrol.

El daño económico debido a la pérdida de servicios prestados por los ecosistemas ante eventos catastróficos de inundación es especialmente evidente en Cantabria.

Los principales impactos sobre las obras portuarias hacen referencia a la pérdida de operatividad (tiempo que un puerto dispone para llevar a cabo sus operaciones de entrada de buques, carga y descarga de mercancías) y a la pérdida de fiabilidad (condiciones de diseño) de las estructuras. En este estudio la pérdida de operatividad está relacionada con el aumento de altura de ola en la bocana (detrimento de las condiciones de navegabilidad en el acceso al puerto), mientras que la pérdida de fiabilidad puede ser debida al aumento del nivel del mar o a la mayor intensidad de los

oleajes.

Si los cambios observados en el aumento del nivel del mar y en el desarrollo socioeconómico continuaran como hasta el momento, en el año 2040 la población afectada por inundación permanente estaría en torno al 2-3% de la población total de las provincias de Coruña, Cantabria y Guipúzcoa. Eso suponiendo que la población no adoptase medidas de adaptación adecuadas.

Si la sociedad actual se viera enfrentada a la subida del nivel del mar considerada para el año 2100, sin incorporar medidas de adaptación, el valor acumulado de las pérdidas futuras alcanzaría cifras entre 500 y 4.000 millones de euros, lo que supone cifras de entre el 0,5% y el 3% del PIB anual según las provincias y escenarios.

Las infraestructuras son el principal activo expuesto en todas las provincias estudiadas. Para un escenario de subida de nivel del mar global de 85 cm (próximo al peor previsto por el IPCC) en el año 2100, más del 10 % del suelo correspondiente a infraestructuras se verá afectado en las provincias gallegas, llegando al 22 % en Coruña.

6.1. Introducción

La riqueza de la costa española tiene un valor incalculable pero, como hemos podido ver, también es muy sensible a los impactos del cambio climático. A pesar de esto, se hace necesario una mayor concienciación, previsión y planificación por parte de las autoridades frente a los efectos y riesgos que supone el cambio climático en los ecosistemas y el sistema socioeconómico costero en España: ¿cuál es la dimensión del problema al que nos enfrentamos?, ¿cuáles son las prioridades de actuación? Probablemente, hasta ahora, estas preguntas no hayan sido abordadas y respondidas adecuadamente a nivel nacional. Tan sólo algunos estudios de mayor escala (e.g. Ciscar et al. 2011) y otros pocos de mucho detalle (e.g. Alvarado-Aguilar et al. 2012, Fatoric y Chelleri 2012) intentan abordar estas cuestiones. Ante un aumento en la preocupación por el cambio climático y el creciente enfoque en la necesidad de adaptación, se hace necesario dar respuestas a los gestores, que sirvan como base para el planteamiento de políticas, estrategias y medidas de adaptación efectivas que permitan un desarrollo sostenible de la costa.

La inundación es uno de los principales impactos identificados en la costa española, potenciado además por la subida del nivel del mar. Por ello en este estudio se plantea evaluar cuáles son los riesgos y consecuencias que sufren los sistemas natural y socioeconómico debido a inundación costera. Cuando hablamos de inundación hay que diferenciar entre la inundación permanente originada por la subida del nivel del mar (y por lo tanto la pérdida de superficie seca) y la inundación esporádica y catastrófica debida a eventos extremos de inundación. Hay que señalar aquí que, en este estudio, los cambios contemplados en los eventos extremos de inundación son debidos a la subida del nivel del mar, y no debidos a los cambios en el oleaje o marea meteorológica. El indicador utilizado para estudiar la inundación por eventos extremos es la cota de

inundación que ocurre una vez cada 50 años por término medio (periodo de retorno de 50 años). Esta cota de inundación, que en la actualidad corresponde a ese período de retorno, sufrirá un aumento en la frecuencia de los eventos (aumentará su probabilidad de ocurrencia), ya que al aumentar el nivel del mar, esa cota se alcanzará más frecuentemente. Ambos casos se tendrán en cuenta y se diferenciarán a lo largo del estudio.

Para alcanzar este objetivo se plantean dos hitos más específicos:

- Identificar los ecosistemas de la costa en riesgo frente a la subida del nivel del mar y valorar los posibles daños sobre los servicios prestados, así como estimar las consecuencias sobre los humedales para distintos escenarios de cambio climático.
- Estimar el riesgo y las pérdidas económicas, ante una situación de no adaptación, teniendo en cuenta los escenarios climáticos sobre la sociedad actual en el año 2100 y un escenario climático sobre la sociedad futura de 2040.

Por otro lado, la importancia de los puertos en el litoral español plantea la necesidad de un estudio de las consecuencias del cambio climático sobre su funcionamiento y fiabilidad. En este caso, el estudio se lleva a cabo a través de indicadores que permitan realizar un primer análisis del impacto y sus consecuencias, evidenciando así las zonas potenciales de impacto que requieren un estudio más detallado y particular para cada puerto.

6.1.1. Escenarios propuestos

Para dar respuesta a las preguntas planteadas hemos de definir unos escenarios futuros sobre los que evaluar el daño. La estimación de las consecuencias de la inundación costera debida al cambio climático estará sujeta a unos escenarios potenciales de cambios en el clima y cambios en la vulnerabilidad.

Los escenarios de riesgo propuestos para estimar las consecuencias sobre el sistema natural están basados en la combinación de los distintos escenarios climáticos planteados (apartado 4.1) con la vulnerabilidad actual del sistema natural. En este caso esta vulnerabilidad está caracterizada por la base de datos VANE que valora los activos naturales, es decir, cuantifica de manera homogénea los servicios ecosistémicos. Ante la falta de información acerca de la valoración futura de los ecosistemas hemos decidido ensayar las consecuencias sobre el sistema natural asumiendo su vulnerabilidad actual, es decir, vamos a cuantificar la afección sufrida por el sistema natural actual si experimentase la inundación costera del año 2040 y del año 2100. La Tabla 8 resume los escenarios de riesgo propuestos para el estudio de las consecuencias sobre el sistema natural, los escenarios climáticos y de vulnerabilidad que los componen y el año horizonte en el que se calculará la afección.

Escenarios potenciales de cambio climático	Escenario climático	Escenario no climático	Año horizonte
N1	C1 (subida NMMG 50 cm)	V0 (vulnerabilidad actual)	2100
N2	C2 (subida NMMG 85 cm)	V0 (vulnerabilidad actual)	2100
N3	C3 (subida NMMG 2 m)	V0 (vulnerabilidad actual)	2100
N4	C4 extrapolación tendencia histórica	V0 (vulnerabilidad actual)	2040

Tabla 8. Tabla resumen de los escenarios de riesgo planteados para estimar las consecuencias sobre el sistema natural. Fuente: IH Cantabria.

Para estimar las consecuencias sobre el sistema socioeconómico se utilizarán distintas combinaciones de los escenarios climáticos (apartado 4.1) y no climáticos (apartado 4.2) planteados. La Tabla 9 muestra un resumen de los escenarios potenciales de cambio climático propuestos, el año horizonte considerado en cada uno y la combinación de cambios en el clima y en la sociedad contemplados.

Escenarios potenciales de cambio climático	Escenario climático	Escenario socioeconómico	Año horizonte
E1	C1 (subida NMMG 50 cm)	V0 (sociedad actual)	2100
E2	C2 (subida NMMG 85 cm)	V0 (sociedad actual)	2100
E3	C3 (subida NMMG 2 m)	V0 (sociedad actual)	2100
E4	C4 extrapolación tendencia histórica	V1 (sociedad 2040)	2040

Tabla 9. Tabla resumen de los escenarios de cambio climático planteados. Fuente: IH Cantabria.

Los escenarios propuestos no consideran ninguna medida de adaptación, es decir, la valoración que se hace del riesgo asociado al cambio climático sobre los sistemas costeros es en términos potenciales, como una consecuencia o daño que pudiera ocurrir en el caso extremo de no hacer nada.

6.1.2. Metodología para el análisis del riesgo

El riesgo es un concepto que atiende a distintas definiciones y métodos de estimación. En este estudio vamos a considerar la definición de riesgo planteada por la Comisión Europea, que se refiere a la probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas como resultado de una amenaza o peligro sobre una zona expuesta a la misma durante un periodo de tiempo determinado (Schneiderbaner et al. 2004). Por lo tanto, el riesgo es función de la probabilidad de ocurrencia de esa amenaza (peligrosidad), de la exposición de la zona o elementos objeto de estudio y de la vulnerabilidad de los mismos (Figura 41).



Figura 41. Esquema conceptual de la estimación del riesgo. Fuente: IH Cantabria.

En este análisis, el riesgo que se va a estimar para los distintos escenarios de cambio climático está asociado al impacto de inundación. Se va a considerar la inundación permanente debido a la subida del nivel del mar y la inundación potencial debida a los eventos extremos de inundación. Para ello, a lo largo del documento se han ido analizando los factores que componen el estudio del riesgo. La peligrosidad (secciones 3.2 y 3.3) incluye el estudio de las amenazas (eventos físicos potencialmente dañinos) para los sistemas costeros como son la subida del nivel del mar, cambios en el oleaje y viento, eventos extremos de nivel del mar, etc.; y la vulnerabilidad y los elementos expuestos quedan descritos en el apartado 3.4.5.

La expresión del Riesgo (R) quedaría representada como función de la Peligrosidad (H), la Exposición (E) y la Vulnerabilidad (V) mediante:

$$R = H \cdot E \cdot V \quad (1)$$

El paso del planteamiento teórico al práctico en el cálculo del riesgo está condicionado por los datos disponibles para el estudio. En este caso, el enfoque planteado está basado en el cruce de capas con datos geográficos: por ejemplo, la peligrosidad está representada por la subida del nivel medio del mar regional o la cota de inundación en cada lugar de estudio, la exposición se caracteriza a través de la topografía del terreno

(en este caso un modelo digital del terreno de 5 m de resolución horizontal) y la vulnerabilidad viene representada por la población y los usos del suelo.

Atendiendo a la definición empleada, el riesgo se evalúa como cambios en la probabilidad. Sin embargo, el cruce de estas capas SIG (Sistema de Información Geográfica) permite obtener las consecuencias de ese riesgo en términos de población y área inundada y, posteriormente, aplicando una valoración económica a los distintos elementos de los sectores estudiados (ecosistemas, agricultura, industria, etc.) se pueden estimar los daños ocasionados por la subida del nivel del mar o los eventos extremos de inundación en el año horizonte (mediados o finales del siglo XXI).

6.1.3. Indicadores económicos de riesgo

Las consecuencias sobre el sistema natural van a medirse a través de indicadores de superficie afectada para ciertos ecosistemas, pero también a través de un indicador de tipo económico para poder valorar los servicios ecosistémicos mediante un flujo monetarizado.

Para medir las consecuencias sociales del cambio climático en la costa se va a utilizar como indicador la población expuesta a inundación bajo los escenarios considerados.

Para cuantificar económicamente el riesgo no asociado a los ecosistemas abordaremos el análisis por tres vías.

- Riqueza afectada: Estudiaremos en primer lugar la cuantificación del stock de capital afectado, midiendo la riqueza en capital afectado por el cambio climático en la costa. Realizaremos así una valoración de los activos en riesgo.
- Producción anual: En segundo lugar se medirá el PIB afectado, la producción anual del conjunto de las áreas afectadas que se ve alterado por los eventos de cambio climático. De este modo caracterizaremos el flujo de actividad económica futura que puede verse afectado.
- Capacidad de recuperación: En tercer lugar se trabajará con la Renta Familiar Bruta Disponible (RFBD), es decir la capacidad de soporte estimada para los sujetos afectados. Cabe destacar que este indicador debe de ser leído en sentido negativo, es decir cuánto más rica es una región, podremos obtener más pérdidas económicas, pero también tendremos mejores condiciones de resistencia en la sociedad. Cabe asimismo citar que la aportación de dicho indicador será mucho más visible cuando descendamos a la escala municipal.

Cada uno de los indicadores es pertinente para exhibir distintas consecuencias y aporta una información distinta. No obstante existe una coherencia interna entre ellos puesto que en definitiva muestran diferentes caras de un tejido socioeconómico.

Hay que tener en cuenta ciertas salvedades, como que la evaluación del stock de capital o del valor añadido bruto (a través del PIB) asociado a un área afectada por la dinámica costera estimada para el futuro, no debe ser leída como una evaluación estricta de la función de daño estimado. El hecho de que una unidad de stock de capital se encuentre ubicada en un área que se estima susceptible de inundación dentro de 50 años ha de ser comprendida como un indicador del capital sobre el que se estima que será necesario actuar, más que como una predicción catastrófica. Además, la valoración económica de los bienes y servicios que vaya a recibir o de los que deba prescindir una sociedad futura, será el resultado de sus decisiones, posibilidades y valoraciones. Ponerse en el papel de las condiciones en que se encontrará la sociedad futura a causa de nuestras decisiones presentes sin entrar en contradicciones éticas requiere como mínimo valorar los servicios de forma equivalente a la percepción presente que tenemos del problema.

Para identificar la ubicación espacial de los usos del suelo (actividad agropecuaria, industrial, etc) se ha utilizado el Sistema de Información sobre la Ocupación del Suelo en España (SIOSE). Para ser consistente con el stock de capital estudiado, las diversas categorías proporcionadas en la base de datos se han agrupado en suelo urbano, industria, infraestructuras, agricultura y turismo.

6.1.4. Análisis desarrollado

Es importante aclarar que las aproximaciones desarrolladas no deben tomarse ni como valoraciones contables que tratan de aproximarse a un valor concreto del daño desvelando sus componentes, ni como predicciones que aspiran a describir una situación futura. En ese sentido se trata, por un lado (i), de caracterizar los efectos derivados de los cambios en las dinámicas costeras presentando imágenes que describan la situación creada desde diferentes puntos de vista y por otro (ii), de “ensayar” el contexto económico al que se enfrentaría esta sociedad en un hipotético caso pésimo que permita diagnosticar la importancia del problema y evaluar las prioridades de actuación. Ha de hacerse constar asimismo que este estudio representa una aproximación integrada espacialmente y parte de la riqueza de la aproximación solo se observa si analizamos el problema con una escala de agregación menor. El objeto del estudio es caracterizar la exposición a que la sociedad se ve sometida cuando nos enfrentemos a los eventos climáticos descritos. Se trata pues de dar un primer paso hacia la valoración económica del daño a que eventualmente nos enfrentaremos.

En el primer sentido (i) caracterizaremos los efectos analizando las tres aproximaciones descritas al fenómeno de la alteración de la dinámica socioeconómica, y que presentan el mismo problema desde tres puntos de vista distintos. Así, el análisis del stock de capital afectado nos informará del grado de alteración de los recursos productivos de la economía y del nivel de bienestar individual y colectivo que se va a ver afectado. La estimación del stock de capital productivo que afecta a la actividad de los distintos sectores y que se ubica en las áreas afectadas por la inundación nos presentará una radiografía de las alteraciones de la función de producción de la economía. La valoración del stock de capital en infraestructuras y en capital privado y público urbano que se verá afectado por los cambios de la dinámica costera, nos permitirá completar el cuadro del daño sufrido por una sociedad que ha dedicado años de esfuerzo productivo y ahorro de

rentas e inversión de las mismas para construir un entorno proclive al bienestar y al crecimiento de la riqueza y se ve afectado por dinámicas inesperadas. Una vez completado ese análisis, la revisión de las variaciones en el PIB generado en los años futuros nos presentará una nueva visión del mismo fenómeno, comprobaremos que una sociedad más pobre, fruto de las inversiones afectadas, no solo ve destruirse parte de su ahorro pasado, sino que, en consecuencia, comprueba que reproducir esta riqueza le va a resultar mucho más costoso en el futuro. En ese proceso, las diferencias en productividad entre las sociedades afectadas marcarán una diferencia crítica en la capacidad de recuperación. Finalmente, aunque no hemos profundizado demasiado en ello a esta escala, hemos podido desarrollar una metodología que permita caracterizar el esfuerzo que representa el daño sufrido identificando la renta familiar disponible de las personas afectadas, lo que por un lado permite identificar su capacidad de soporte relativizando la dimensión del impacto soportado, y por otro lado permite establecer las reservas y resiliencia económica de las sociedades afectadas. No se trata pues ni de compartimentos estancos ni de fotos parciales, sino de capas de aproximación que ayudan a comprender la complejidad del problema en que estamos inmersos y que lo iluminan con diversos filtros.

En el segundo sentido (ii), al someter el territorio a un ensayo de lo que podría representar una situación futura pésima, es perfectamente comprensible que el análisis de las condiciones futuras de una sociedad ubicada en un determinado entorno espacial no pueda ser explicado simplemente por las condiciones iniciales del problema. Un estudio detallado de la situación requiere una predicción certera del comportamiento de los agentes económicos y sociales en ese entorno en los años horizonte. Esta predicción es en sí misma contradictoria con la elaboración del estudio, ya que la mera reflexión sobre la situación a la que se enfrenta una sociedad lleva en su seno el germen de una nueva trayectoria evolutiva, si se produce en el entorno adecuado. Sin avanzar hasta esos extremos, es necesario precisar y recordar que dado lo complejo del entorno a analizar, los resultados obtenidos deben ser entendidos como los resultados de un ensayo al que se somete a una hipotética sociedad futura, que trata de definirse de forma coherente con la realidad observable hasta el momento y cuya sensibilidad a los fenómenos se desea caracterizar a través de unas pruebas de stress que indiquen hacia dónde han de enfocarse las prioridades y que permitan realizar una comparación entre la sensibilidad en distintos puntos del espacio.

El tratamiento analítico de los indicadores se ha desarrollado con el siguiente criterio: para los escenarios caracterizados exclusivamente por una afección final situada en el 2040 o 2100, nos hemos limitado a definir un horizonte económico tendencial o incluso idéntico al escenario presente y hemos evaluado la afección que dicho evento representaría. Así, estableciendo que el PIB asociado a áreas inundables (con unas hipótesis de desagregación) en el año horizonte, o el stock de capital asociado a las mismas, adquiere un cierto valor, habremos avanzado hacia la caracterización del sufrimiento de la sociedad futura. Sin embargo, para tratar homogéneamente dichos efectos y hacerlos comparables para distintos años horizontes, hemos de descontarlos y reducirlos a su valor presente, de forma que no solo estén expresados en € constantes (del 2008), sino que además se ha tenido en cuenta el impacto diferenciado entre distintos años horizontes. No debemos olvidar que el objetivo último del análisis

económico de las medidas de adaptación es cuantificar el esfuerzo que nos podemos permitir en el presente para proteger el bienestar futuro y esto nos obliga a descontar los datos económicos representativos de la situación futura. No hacerlo así nos llevaría a justificar casi cualquier inversión con impacto a largo plazo. En consecuencia cualquier valor futuro F , medido en unidades monetarias constantes, asociado a un periodo T , es valorado en términos presentes VP , con una tasa de descuento r como:

$$VP(F, r, T) = \frac{F}{(1+r)^T} \quad (2)$$

Por otro lado, cuando nos enfrentamos a un escenario donde podemos identificar la evolución tendencial de las variables climáticas, nuestro problema es ligeramente distinto, si contamos con un escenario climático y económico variable a partir de la extrapolación de tendencias, podremos realizar una “película” de la aparición de los efectos y capturar el efecto de la distribución espacio temporal diferenciada de los mismos. Para ello en primer lugar determinamos la exposición marginal de cada año en función de los valores pronosticados, y en segundo lugar desagregamos espacialmente la actividad económica asociada al área adicionalmente expuesta en cada periodo. A continuación obtenemos el valor representativo del flujo de actividad económica afectado cada año con la suma descontada al momento de la inundación del flujo (PIB, VAB...) afectado entre el momento de la inundación y el año horizonte final. La fórmula empleada es la siguiente:

$$VP_t(Exp_t) = \sum_{n=t}^T \frac{(1+r)^n - 1}{(1+r)^n \cdot r} \quad (3)$$

Con esto el impacto se ha reducido a suma secuencial de valores asociados a los incrementos de nivel de inundaciones anuales $F(t)$, que son de nuevo objeto de descuento para trasladarlos al presente con la fórmula del descuento anteriormente empleada:

$$VP(F(t), r, t) = \sum_{t=1}^T \frac{F(t)}{(1+r)^t} \quad (4)$$

Finalmente, una vez obtenido el Valor Presente Total (Q) de la secuencia gradual de inundación, obtenemos el Valor Medio Anual Equivalente ($VMAE$) a este daño a fin de contar con un indicador comparable homogéneamente con el PIB. La expresión a emplear es ahora:

$$VMAE = \frac{Q}{\sum_{n=1}^T \frac{(1+r)^n - 1}{(1+r)^n \cdot r}} \quad (5)$$

6.1.5. Incertidumbres y necesidades de información

La estimación socioeconómica y ambiental del riesgo planteada en este estudio supone un paso muy importante, tanto cualitativa como cuantitativamente, en el estudio del cambio climático en la costa española, y sienta las bases para el planteamiento de estrategias y medidas de adaptación. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el estudio tiene ciertas limitaciones debido principalmente a tres fuentes de error:

- la incertidumbre inherente de los escenarios de cambio climático
- las limitaciones de las bases de datos disponibles
- la aplicación de un modelo simplificado de inundación

A continuación describimos más ampliamente las limitaciones encontradas.

Escenarios de cambio climático y escenarios socioeconómicos

Los escenarios de cambio climático, ya se ha explicado que son situaciones hipotéticas basadas en la suposición de distintas evoluciones de emisión de gases de efecto invernadero. En función de estas rutas de concentraciones se producirá un aumento de la temperatura global y, en consecuencia, un aumento del nivel del mar. Este hecho lleva inherente una incertidumbre asociada a los propios escenarios, que se traducirá en una determinada probabilidad de ocurrencia.

Otra limitación en cuanto a la definición de los factores climáticos es la de considerar únicamente los cambios en los fenómenos extremos de inundación como consecuencia de la subida del nivel del mar. Los cambios en la altura de ola extremal y la dirección del oleaje y los cambios en la intensidad, frecuencia y trayectoria de las borrascas podrían dar lugar a cambios en la frecuencia e intensidad de la cota de inundación. Sin embargo, las conclusiones obtenidas por la comunidad científica en lo referente a cambios en el oleaje y tormentas para los nuevos escenarios RCP son todavía poco concluyentes y llevan asociada mucha incertidumbre, por lo que en este estudio se ha decidido sólo considerar como *driver* principal la subida del nivel del mar.

Desde el punto de vista socioeconómico también se desprenden ciertas fuentes de error o restricciones a tener en cuenta. La elaboración de un escenario económico predictivo que trata de caracterizar una sociedad hipotética compatible con la sociedad presente no puede ser tratada como una predicción del comportamiento futuro. Predecir que las sociedades que experimenten cambios durante los próximos 40 años no van a ser capaces de aprender de la experiencia de éstos y corregir su comportamiento sería una hipótesis que invalidaría los resultados. Sin embargo, la adopción de una sociedad tipo verosímil como soporte de nuestro ensayo sí dota de credibilidad al estudio. El hecho de que un activo natural o económico sea destruido se caracteriza a través de la valoración de los flujos de servicios que dejarán de disfrutarse a partir de ese momento con una duración indefinida. No obstante la experiencia demuestra que si bien los ecosistemas se

ven afectados, a menudo de forma irreversible y dicha alteración se produce efectivamente, y puede ser medida, el tejido natural inicia desde ese momento una nueva senda evolutiva generando una nueva situación que a su vez acaba siendo productiva, y los nuevos servicios generados debieran ser considerados. En esos términos para poder valorar verazmente la pérdida deberíamos ser capaces de predecir la senda evolutiva que cabe esperar que emprenda un ecosistema futuro, que sometido a unas presiones antrópicas aún por definirse, demuestre una fragilidad que lo lleve a un nuevo estado. Por último, una cuestión reiteradamente discutida en la literatura es la idoneidad de introducir una tasa de descuento en los análisis. A la pregunta de si ha de descontarse el peso de costes y beneficios futuros a la hora de totalizar en un balance presente su contribución a las tomas de decisiones presentes, la respuesta ha de ser categóricamente afirmativa, no hacerlo implicaría asumir beneficios infinitos para una medida de protección de todo activo cuyas aportaciones al bienestar se prolonguen hacia el futuro sin fecha de caducidad. Una cuestión diferente es cuál ha de ser la tasa de descuento que representa el compromiso normativo entre los intereses de las generaciones futuras y los de las generaciones presentes. Hemos adoptado a estos efectos las recomendaciones del libro verde (HMTO Green Book) que sitúan nuestra tasa de descuento en el 3%.

Bases de datos disponibles

A nivel nacional, la disponibilidad de bases de datos de gran detalle es limitada. Además, hay que tener en cuenta que estamos manejando distintos tipos de información: población, usos del suelo, modelo digital del terreno (MDT), datos económicos... por lo que la homogeneidad de todas las bases de datos y su misma resolución espacial es un requisito difícil de conseguir. En este estudio las diferencias espaciales entre las bases de datos varían entre los 5 m de resolución espacial horizontal del MDT, el kilómetro cuadrado de resolución de la base de datos de población o la hectárea de resolución de la base de datos de usos del suelo (SIOSE). Por otro lado, la valoración económica establecida para estimar el daño también proviene de distintas fuentes de datos, períodos de tiempo o escalas espaciales (desde provincias a municipios o comarcas), los cuales han sido homogeneizados mediante un criterio de experto.

Desde el punto de vista del MDT, para llevar a cabo un estudio a escala nacional o regional, una topografía a 5 m de resolución es adecuada. Esta resolución mejora mucho la de otras bases de datos disponibles como el Global Land One-Kilometer Base Elevation (GLOBE) de 1 km de resolución o el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de 90 m de resolución utilizada en el estudio del riesgo por subida del nivel del mar y marea meteorológica en la ciudad de Copenhague (Hallegatte et al. 2011) y en el estudio de exposición y vulnerabilidad frente a eventos extremos climáticos en la ciudad de Dar es Salaam en Tanzania (Kebede y Nicholls 2012). Sin embargo, en zonas bajas o donde la tipología del frente costero es muy variada esta resolución del modelo digital del terreno no capta bien los cambios en la topografía y sería más adecuado contar con datos de un sensor aerotransportado LiDAR (Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging) topográfico que alcanza 1 m de resolución en horizontal. El estudio

realizado por Chust et al. (2013) sobre la inundabilidad de los estuarios y costa de Bizkaia por ascenso del nivel del mar fue realizado con datos topográficos procedentes de LiDAR de 1 m de resolución y el mismo procedimiento de inundación mediante el corte de capas georreferenciadas. Este estudio permite comparar los resultados de inundación en la provincia de Vizcaya llevados a cabo mediante un LiDAR topográfico de 1 m de resolución (Chust et al. 2013) y mediante el modelo digital del terreno de 5 m de resolución utilizado en este estudio. Hay que tener en cuenta que la comparación no puede hacerse rigurosamente puesto que los escenarios de inundación no son exactamente iguales, pero nos permite hacernos una idea de la importancia de la base de datos topográfica. Los resultados a comparar son los correspondientes a la inundación permanente para el escenario de ascenso de nivel del mar de 49 cm en el año 2100 en el estudio de Vizcaya y los obtenidos en este estudio para Vizcaya con el escenario C1 (ascenso del nivel del mar global de 50 cm regionalizado a cada punto del litoral cantábrico). Con un modelo digital del terreno de 1 m de resolución, un ascenso del nivel del mar de 49 cm inundaría de manera permanente un área de 153,6 Ha, mientras que con el MDT de 5 m la inundación, para 50 cm de ascenso de nivel del mar global), se alcanzan las 1000 Ha, es decir, un orden de magnitud mayor. Esto es debido a que el MDT de 5 m no es capaz de reproducir pequeñas estructuras como muros o represamientos que impiden el paso del agua en zonas bajas y, de esta manera, lo que estamos obteniendo es una cota superior de la inundación.

En cuanto a las bases de datos socioeconómicas también hay que poner de manifiesto ciertas limitaciones. La diferencia de resolución entre el MDT de 5 m y la base de datos de población de 1 km puede provocar una sobreestimación muy elevada de la población inundada sin un tratamiento previo. Para evitar esto la resolución de la base de datos de población se llevó a 5 m, la misma que el MDT (se dividió el píxel de 1 km² en 40000 píxeles de 25 m²), repartiendo homogéneamente la población de cada uno de los nuevos píxeles. Este artificio permite reducir la sobreestimación de población afectada por inundación, pero no deja de ser una aproximación, pues la población no tiene por qué repartirse homogéneamente en el territorio, sino que, más probablemente, se encontrará agrupada en unas zonas u otras. Por otro lado, las bases de datos relativas al VAB y el valor económico del stock de capital son regionales, es decir, manejamos un único valor por región. A la hora de obtener el VAB afectado por inundación o el valor del stock de capital se ha optado por utilizar una relación de superficies. Con este método, nuevamente se asume que el stock de capital, por ejemplo, está homogéneamente repartido por toda la región. Sin embargo, la mayor parte de las infraestructuras y núcleos urbanos se sitúan en la franja costera.

El estudio de Hinkel et al. (2013) sobre los daños debidos a la subida del nivel del mar y los costes de adaptación en el siglo XXI plantea un análisis sobre las limitaciones e incertidumbres de los estudios a escala global y regional. Principalmente hace un análisis de las incertidumbres asociadas a las bases de datos disponibles y los procesos tenidos en cuenta a esta escala de estudio, muchas de las cuales son recogidas en este apartado.

Modelo de inundación

Tal y como se ha explicado, el modelo de inundación utilizado está basado en el cruce de capas georreferenciadas. Una vez definida la línea de costa del modelo digital del terreno y el nivel de inundación para cada escenario, la fusión de ambas capas dará lugar a un área inundada que puede ser delimitada. Además también se tienen en cuenta las áreas interiores que quedan por debajo de la línea de inundación y que están conectadas al área inicial de inundación. Sin embargo éste no es un modelo hidrodinámico que tenga en cuenta el comportamiento de la lámina de agua, la rugosidad del terreno, etc. La manera idónea de abordar un estudio de inundación de alta resolución sería utilizando un modelo hidrodinámico que simule adecuadamente la lámina de agua proporcionando resultados más realistas de la inundación. Sin embargo, el coste computacional de estos modelos es inabordable para un estudio a escala nacional o regional como es este caso.

6.2. Evaluación de las consecuencias sobre el sistema natural

Todos los ecosistemas costeros se verán afectados de alguna u otra manera por el cambio climático. Es difícil estimar cuáles sufrirán mayores consecuencias, pero aquellos situados en el borde costero que se enfrenten a la subida del nivel del mar y, en consecuencia, a la pérdida de hábitat serán los más vulnerables.

Los escenarios de cambio climático propuestos permiten hacer una estimación de cuáles serán las consecuencias del cambio climático sobre los ecosistemas siguiendo la metodología de riesgo propuesta en el apartado 6.1.2. Por un lado, dada la importancia de los humedales en la costa española, se va a hacer una primera estimación de la pérdida de humedales ante distintos escenarios de inundación. Por otro, utilizando datos de exposición de alta resolución en el Cantábrico y datos de vulnerabilidad de la base de datos VANE se van a calcular las consecuencias económicas (en términos de pérdida de servicios ecosistémicos) del cambio climático sobre los ecosistemas costeros del Cantábrico. La respuesta de los ecosistemas ante la subida del nivel del mar será variable, dependiendo de la capacidad de adaptación natural que presenten y lo coartada que se vea debido a la presión del hombre. También se analizará el impacto del aumento de la temperatura del mar sobre las praderas de *Posidonia oceanica*.

6.2.1. Pérdida potencial de humedales

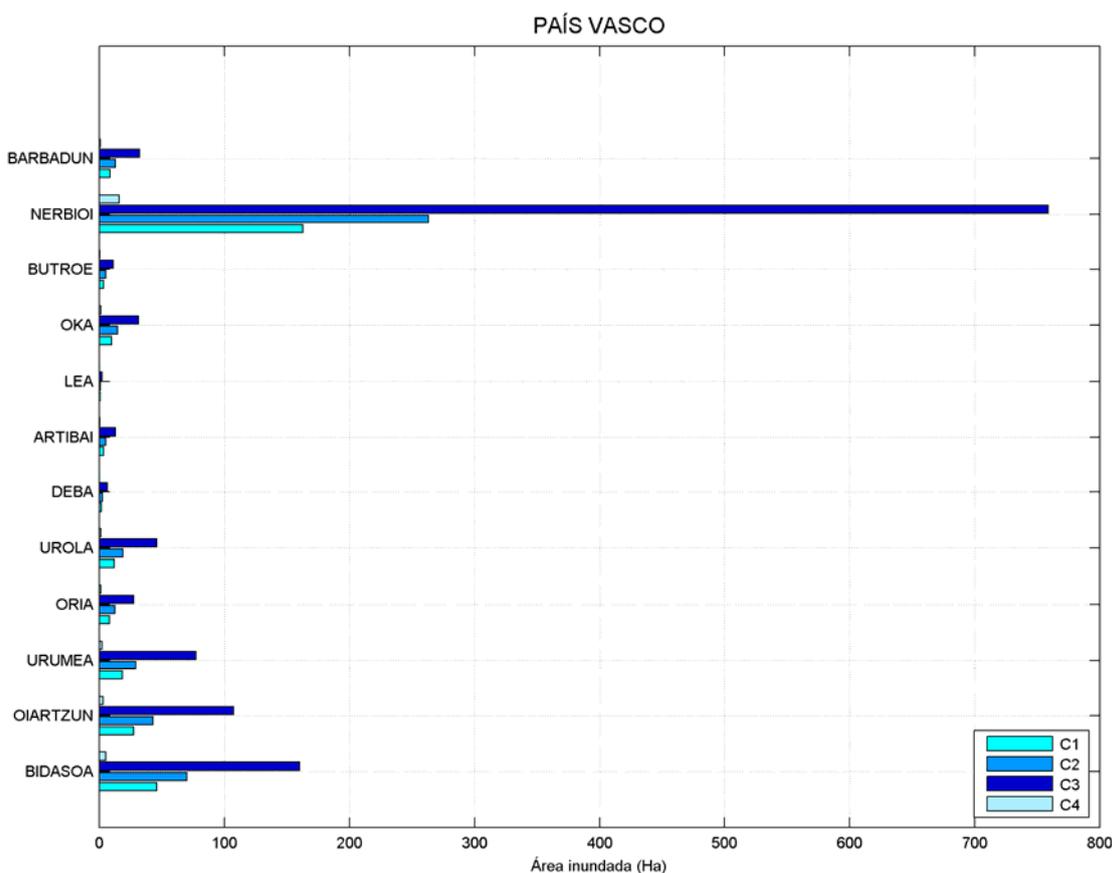
Los humedales, entre los que se incluyen estuarios, marismas, lagunas, marjales, etc., proporcionan numerosos servicios, incluyendo biofiltración, retención de carbono y nutrientes, regulación de gases de efecto invernadero, protección física y abrigo a la línea de costa durante temporales y hábitats para numerosas especies de fauna, flora y comunidades microbianas, muchas de las cuales son únicas. Como se dijo anteriormente la distribución de organismos en los humedales está regida por los niveles de marea, por lo que, presumiblemente, el aumento del nivel del mar es el principal impacto que sufrirán los humedales, ocasionando consecuencias sobre la distribución, abundancia y

riqueza de las especies de flora y fauna que en ellos habitan. Hay que tener en cuenta que los humedales presentan, de forma natural, cierto grado de resiliencia. Es decir, son capaces de aguantar, hasta cierto punto, la presión a la que se ven sometidos y los cambios en las condiciones naturales, presentando una capacidad de adaptación natural. A medida que sube el nivel del mar, el humedal es capaz de migrar tierra adentro inundando nuevas zonas, dando lugar a nuevos hábitats y a la colonización de nuevos espacios por parte de las especies del humedal. Sin embargo, puede haber varios factores que alteren este proceso. La acción humana sobre los humedales ha limitado esa capacidad de adaptación. La rigidización del perímetro de los humedales mediante la construcción de frentes urbanos, paseos marítimos, diques o muros impide que el humedal pueda migrar inundando nuevas zonas. Por otro lado, si el volumen sedimentario disponible no es suficiente para seguir el ritmo de aumento de nivel del mar el humedal también verá reducido su tamaño. Esto es característico de zonas con variaciones mareales muy pequeñas y poco aporte de sedimentos, como ocurre en la costa mediterránea, donde el caudal sólido de los ríos se ha visto mermado notablemente debido a la numerosa construcción de presas en el cauce de sus ríos. La falta de sedimento hace que no se puedan mantener los niveles topo-batimétricos del humedal.

Dada la gran importancia ecológica de los humedales, se plantea hacer una primera estimación (mediante una aproximación sencilla) de la pérdida de este ecosistema debido a la subida del nivel del mar para los distintos escenarios de cambio climático propuestos hasta ahora. Para ello se han considerado 80 humedales de especial relevancia a lo largo de la costa española y, utilizando las leyes de áreas y volúmenes de inundación y teniendo en cuenta el porcentaje de perímetro urbanizado en cada uno de ellos, se ha estimado un indicador de la superficie de humedal perdido debido al aumento del nivel del mar. Es decir, el área de tierra que el humedal intentaría colonizar para adaptarse al cambio climático pero que, debido a la rigidización de sus contornos, le resulta imposible. Una de las hipótesis de este modelo sencillo asume la misma exposición para el futuro, por lo que en el año horizonte el porcentaje de superficie de humedal ocupado por el hombre será el mismo que ahora. Los cálculos se han realizado utilizando un modelo digital del terreno de 10 m de resolución horizontal y 1 m de resolución vertical, más grosero que el utilizado para estimar el riesgo sobre el sistema socioeconómico. Los humedales se han representado por comunidades autónomas y/o fachadas marítimas, agrupando así los cuerpos de agua de una tipología similar. Sin embargo, a la hora de comparar los resultados hay que tener en cuenta que el valor obtenido del indicador depende, fundamentalmente, del tamaño del humedal y del grado de rigidización de sus contornos (la limitación de su adaptación natural).

La Figura 42 muestra las Ha de humedal perdidas en los principales humedales de la fachada norte de España. Al hablar de *área inundada* nos referimos a las hectáreas ocupadas por el mar que no se pueden compensar por migración del humedal. Se puede ver que los humedales que sufren mayores pérdidas potenciales de superficie se corresponden con los estuarios o rías de las principales ciudades del norte, los cuales tienen gran parte de sus contornos urbanizados. En el País Vasco destaca la ría de Nervión que se encuentra en Bilbao y tiene urbanizado un 94 % de su perímetro. Esta rigidización de su contorno hace que el humedal pierda su capacidad de adaptación y

suponga una pérdida de más de 750 Ha (superficie que el humedal intentaría colonizar) para un escenario de subida del nivel del mar de 2 m. En Cantabria y Asturias cabe destacar la buena conservación (en cuanto a estado natural de los contornos del humedal), en general, de los estuarios, rías y demás humedales, destacando especialmente Cantabria, donde la pérdida de humedales supone mucha menos superficie que en las demás comunidades de la fachada norte. Resaltan los estuarios de Tina Mayor, Tina Menor, Oyambre y Ajo, con pérdidas muy pequeñas de humedal para todos los escenarios de cambio climático y el Esva en Asturias, que se puede adaptar totalmente a la subida del nivel del mar al ser totalmente natural. En Cantabria los más perjudicados son la bahía de Santander, que perdería alrededor de 375 Ha en el escenario más pesimista y las marismas de Santoña, que perderían en torno a 180 Ha en ese mismo escenario. En el caso de Asturias la ría de Avilés, con casi el 84 % de su perímetro urbanizado, es la que sufriría un mayor impacto sobre el humedal debido a la subida del nivel del mar, al no poder apenas adaptarse.



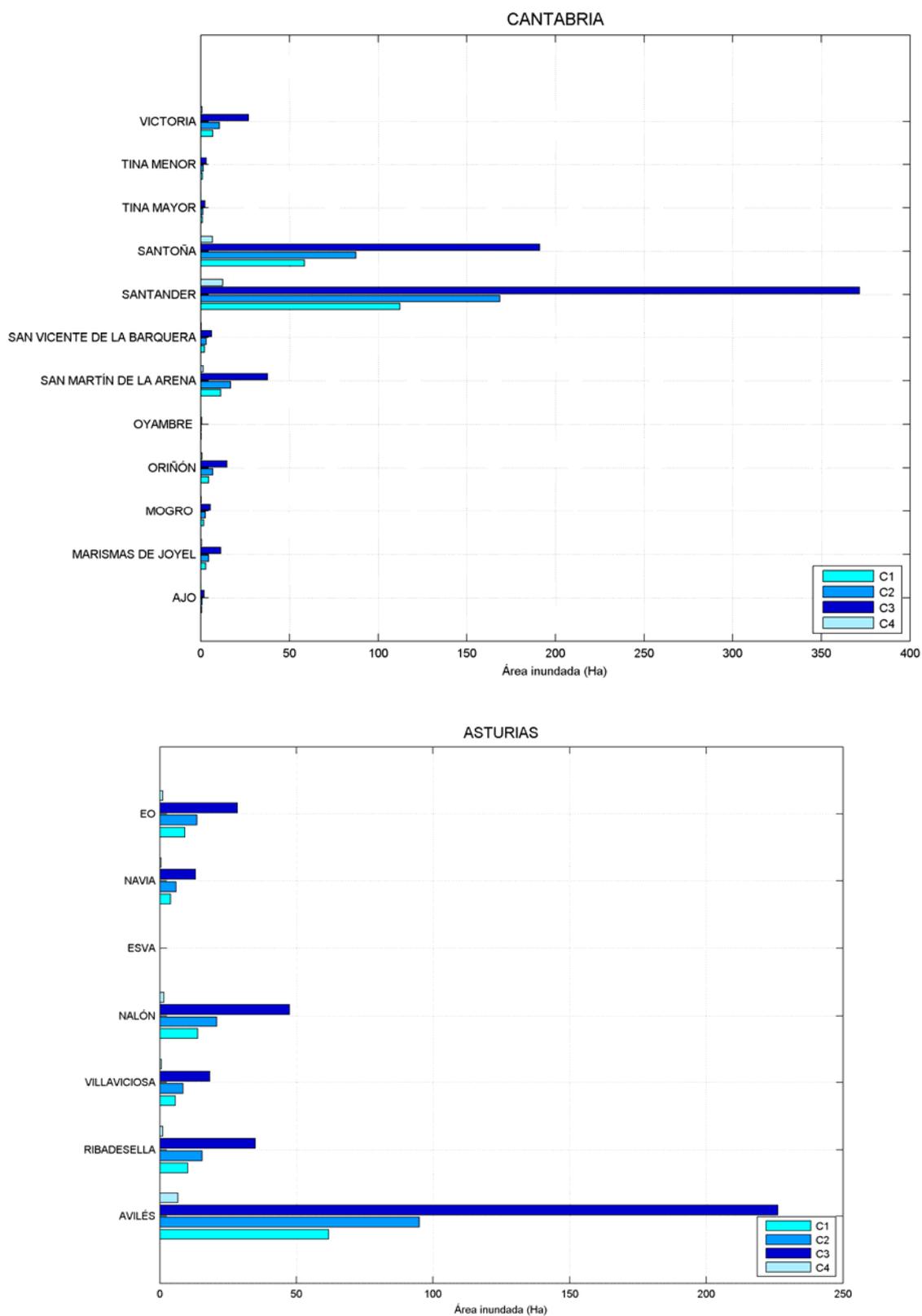


Figura 42. Pérdida potencial de humedales (Ha) debido a la subida del nivel del mar para los escenarios de cambio climático C1-C4 en el Cantábrico. Fuente: IH Cantabria.

Galicia cuenta con 26 humedales, de los cuales 8 son capaces de adaptarse totalmente o sufren una disminución de su superficie muy pequeña (Figura 43). Los humedales que sufren mayores consecuencias son las rías que cuentan con un fuerte desarrollo urbano e industrial, como la ría de Ferrol, el Umia, donde se encuentra Cambados, Lerez con la ciudad de Pontevedra y el Ulla con el núcleo urbano de Rianxo.

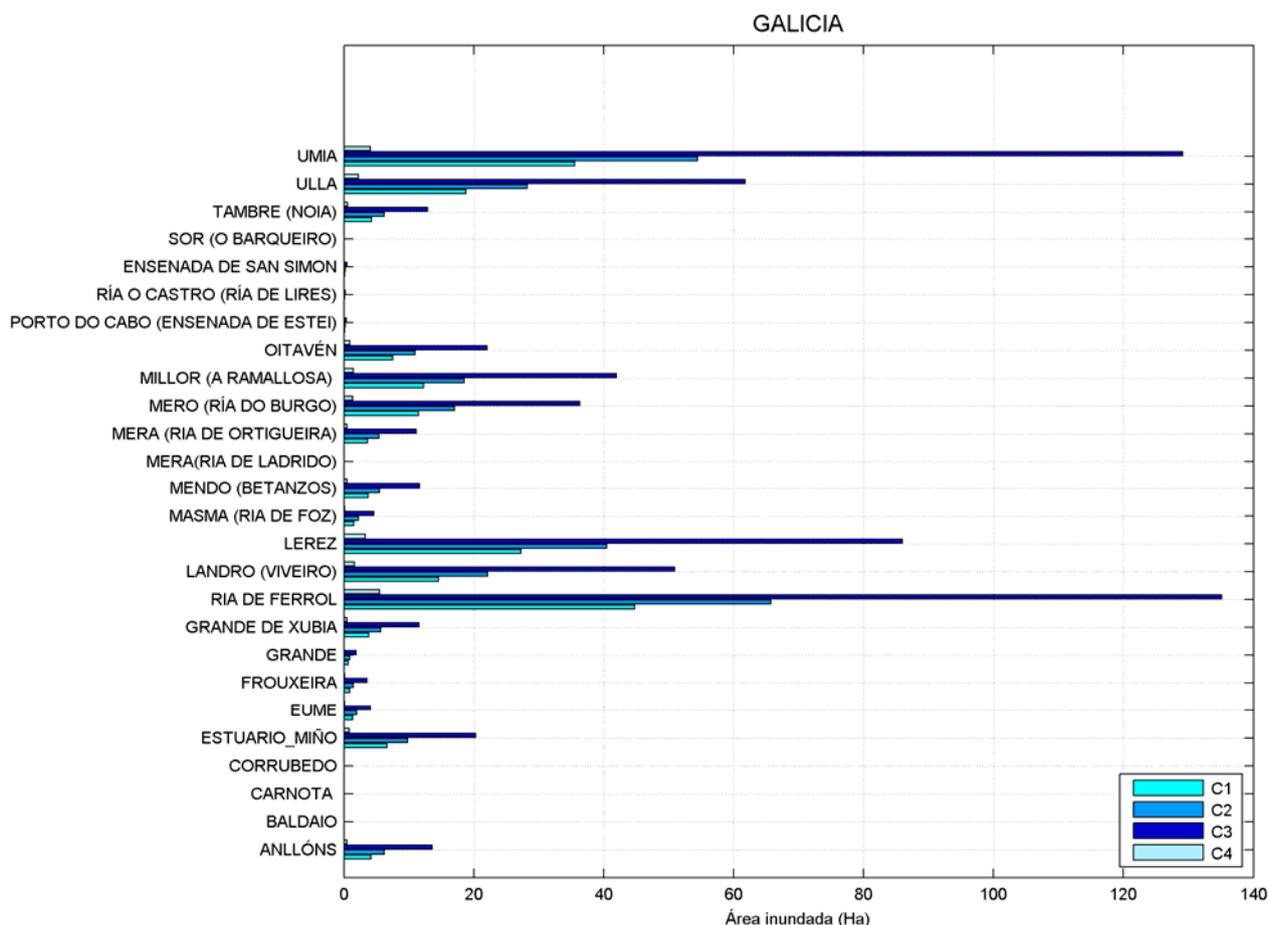


Figura 43. Pérdida de humedales (Ha) debido a la subida del nivel del mar para los escenarios de cambio climático C1-C4 en Galicia. Fuente: IH Cantabria.

La Figura 44 muestra la pérdida de humedales en Andalucía. Esta comunidad autónoma tiene humedales en dos fachadas bien diferenciadas, Golfo de Cádiz y Mediterráneo, lo que les confiere características y tipologías diferentes. La mayoría de los principales humedales de Andalucía se encuentran en el Golfo de Cádiz, siendo algunos de ellos los más importantes de España debido a su tamaño, conservación, riqueza y características. Así destacan el Guadalquivir, el estuario del Tinto y el Odiel y la Bahía de Cádiz, todos ellos con más de 100 km² de superficie. Sólo el Guadalquivir, Marismas del Palmones, estuario del Guadiaro y el Guadalhorce vierten sus aguas al Mar de Alborán y tienen tamaños considerablemente más pequeños que los anteriores (el único que supera el km² es el Guadalhorce con 3 km²). La conservación de la mayor parte de los cuerpos de

agua de Andalucía es bastante buena. Tan sólo la Bahía de Cádiz presenta una urbanización de su perímetro del 60 %, que impide su migración hacia el interior ante un escenario de subida del nivel del mar. Además del estado de conservación del perímetro del humedal, la orografía de la zona determinará una mayor o menor capacidad de inundación. De esta manera, se puede ver que el estuario del Guadalquivir, dado su tamaño y la orografía llana de su desembocadura, para un aumento del nivel del mar de 2 m, podría perder de forma irreversible 11000 Ha de humedal. Gracias a que presenta una buena conservación natural (sólo el 10% de su perímetro está urbanizado), la superficie perdida no es aún mayor pues se asume una gran capacidad de adaptación por migración hacia el interior. Sin embargo, el estuario del Tinto y el Odiel, que tiene más porcentaje de su perímetro urbanizado (casi un 30 %) tiene limitada su capacidad de adaptación natural.

Los humedales situados en la zona Mediterránea (Málaga) pueden adaptarse a la subida del nivel del mar y apenas sufren pérdidas de superficie, además de por su conservación, por la orografía acantilada que, de forma natural, limita su inundabilidad.

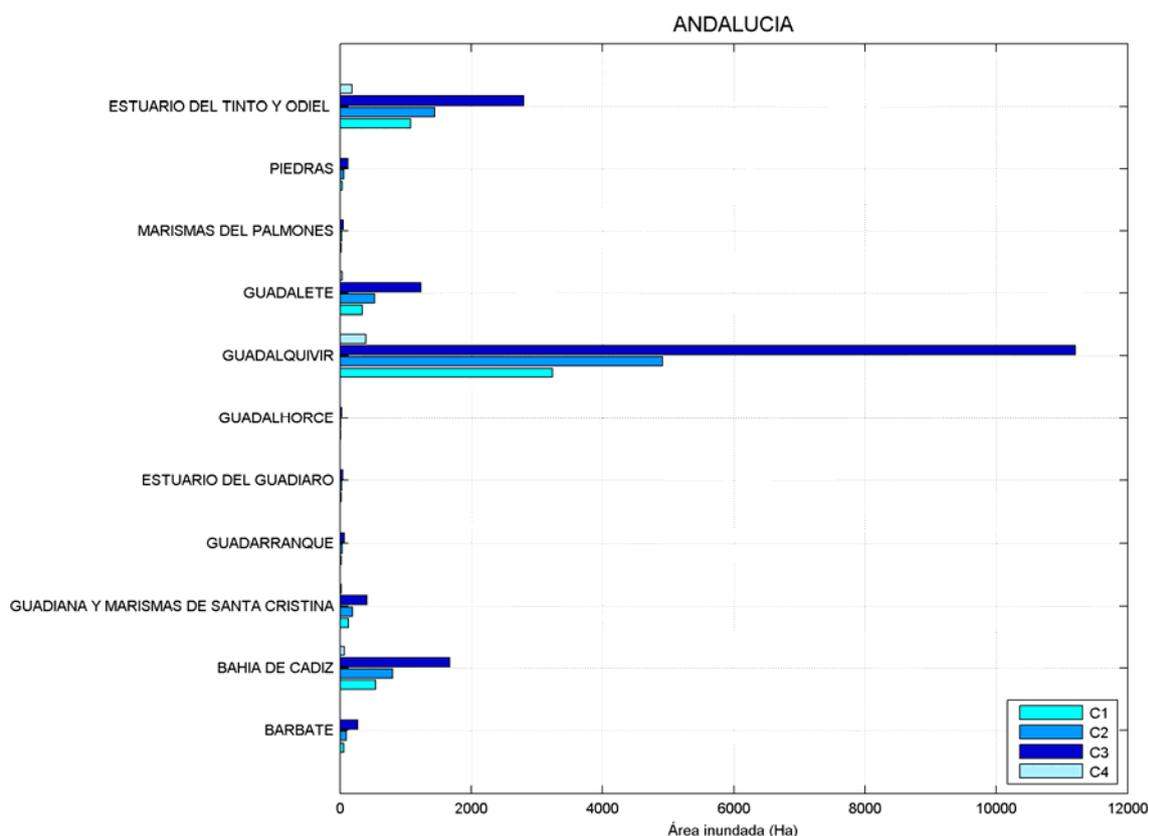
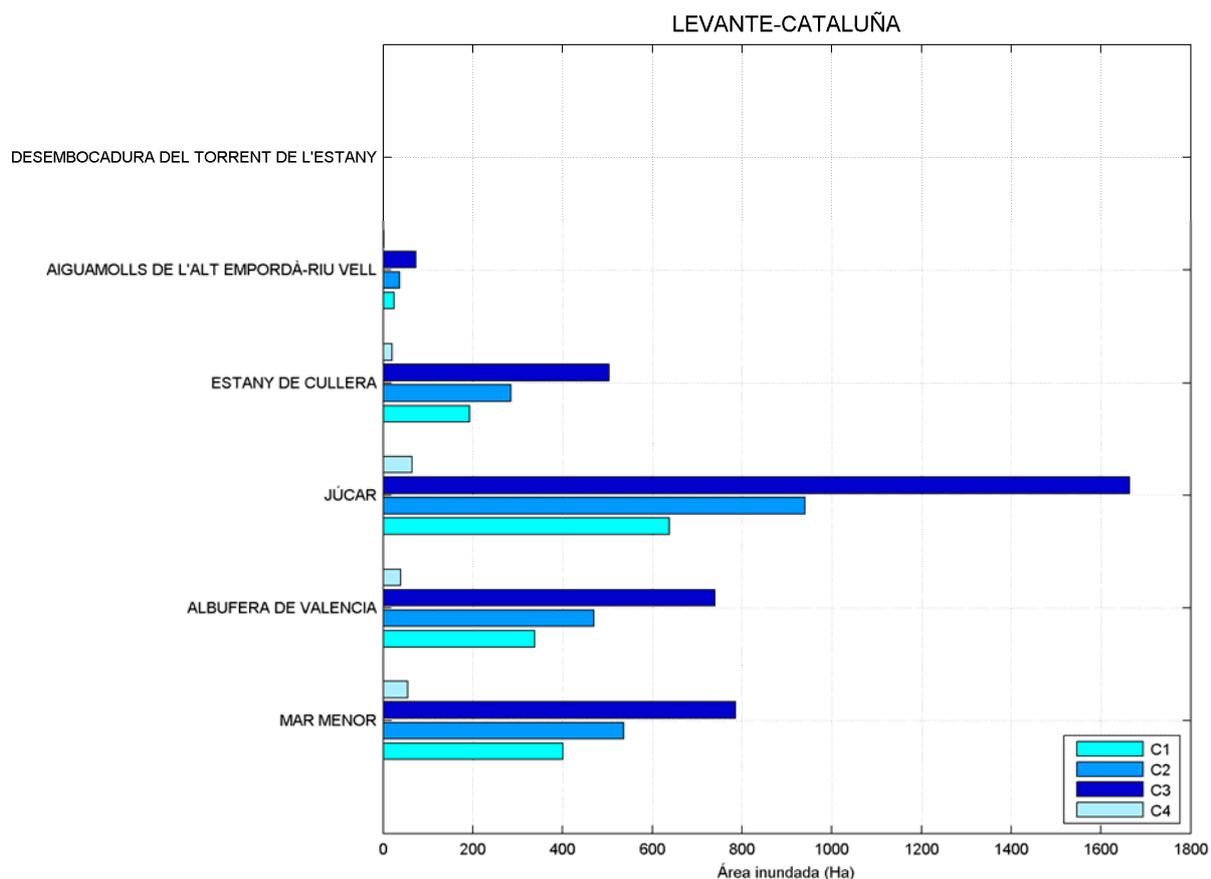


Figura 44. Pérdida de humedales (Ha) debido a la subida del nivel del mar para los escenarios de cambio climático C1-C4 en Andalucía. Fuente: IH Cantabria.

Los humedales del Mediterráneo tienen características tipológicas diferentes a los de la fachada norte y Golfo de Cádiz. Los humedales sometidos a una fuerte variación de la marea astronómica (fachada norte y Golfo de Cádiz) suelen ser estuarios o rías más

encajados, con los contornos bien definidos y de tamaño relativamente importante. Sin embargo, en el Mediterráneo, debido a las características hidrodinámicas (ausencia de marea astronómica) los humedales no presentan zonas intermareales grandes siendo su tamaño bastante limitado. En contrapartida, la orografía de las zonas bajas hace que ante una subida del nivel del mar los humedales colonicen grandes áreas aumentando significativamente su tamaño.

En la zona del levante y Cataluña (Figura 45) los resultados muestran una importante pérdida de humedales ante la subida del nivel del mar, sin embargo, como ya se ha dicho, los terrenos bajos de estas zonas permiten migrar a los humedales gran cantidad de kilómetros tierra adentro, siendo capaces de inundar grandes llanuras costeras. Los humedales que mayor grado de urbanización presentan son el Júcar (58 % de perímetro urbanizado) y el Mar Menor (casi el 60 % de su perímetro urbanizado). La Albufera de Valencia, pese a conservar la mayor parte de su perímetro natural, presentaría una pérdida de superficie grande, en comparación con otros cuerpos de agua, debido a su gran extensión. Por último, las Islas Baleares presentan algunos humedales con total capacidad de adaptación y, por lo tanto, ninguna pérdida de superficie como la Albufera de Mercadal y S´Amarador.



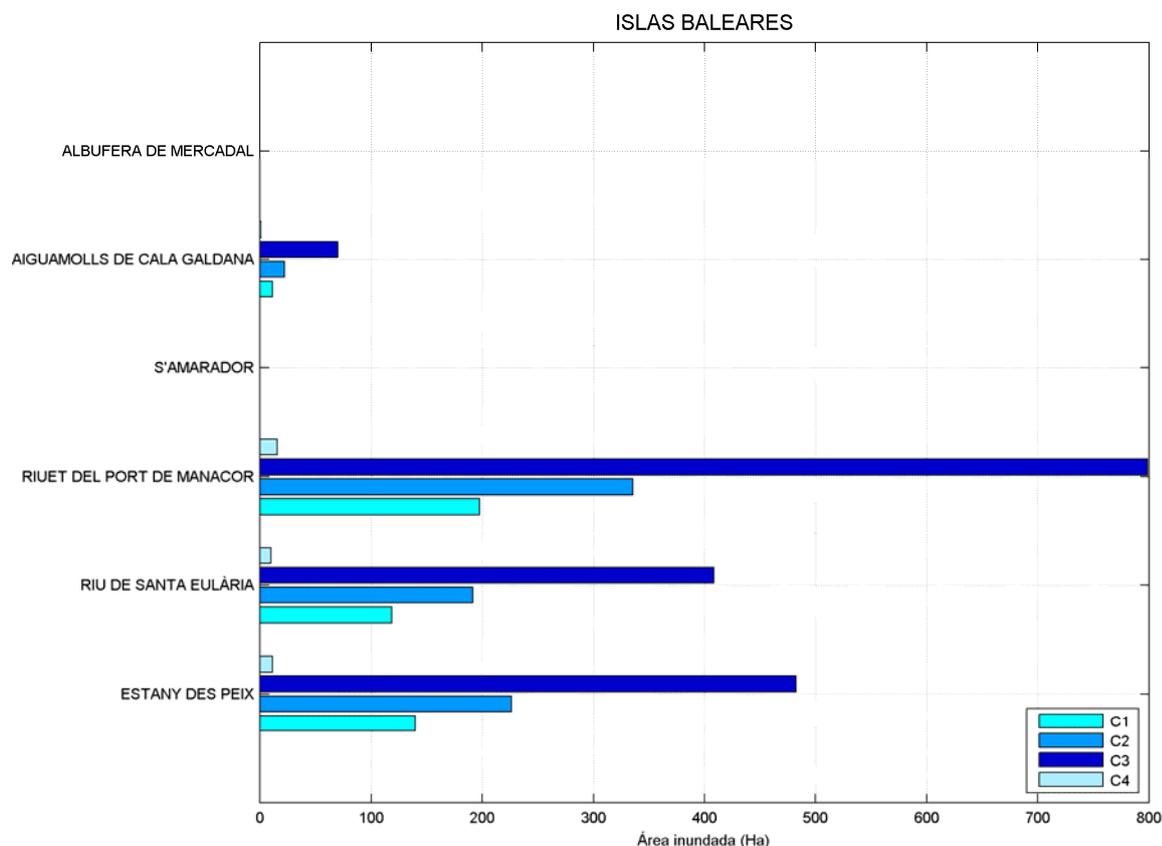


Figura 45. Pérdida de humedales (Ha) debido a la subida del nivel del mar para los escenarios de cambio climático C1-C4 en Mediterráneo español. Fuente: IH Cantabria

6.2.2. Consecuencias de la inundación por efecto del cambio climático sobre los servicios ambientales de los ecosistemas del Cantábrico y Noratlántico

A lo largo de este capítulo ya ha quedado manifestada la importancia ecológica de los principales ecosistemas del litoral español y se han destacado algunos de los servicios que prestan. Las playas proporcionan una perfecta protección costera, además de un uso recreativo muy importante; los humedales, a través de su gran riqueza biológica, son fuentes de importantes recursos marisqueros y pesqueros; las praderas submarinas funcionan como sumideros de carbono, proporcionan protección costera y suponen un importante hábitat y zona de nutrientes para las pesquerías.

Sin embargo, aunque es evidente el papel crucial que desempeñan y el alto valor añadido que suponen para el hombre, hasta ahora no hemos expresado este valor de forma objetiva y cuantificable. Una valoración así de los servicios prestados por los ecosistemas permitiría inferir las consecuencias económicas del cambio climático sobre el

medio natural. Es decir, poder cuantificar los daños económicos debidos a la pérdida de los servicios prestados por los ecosistemas. No se trata aquí de otorgar un “valor de mercado” a los ecosistemas, sino de crear un indicador homogéneo que permita la comparación homogénea de su contribución como soporte de la implantación humana. Para ello se ha hecho uso de la base de datos desarrollada en el proyecto VANE, Valoración de los Activos Naturales de España (Ministerio de Agricultura, Medio Rural y Marino), en el que se valoraron los servicios ambientales generados por los ecosistemas. El objetivo de este proyecto fue dar valor a los bienes naturales a través de los usos y servicios que la naturaleza nos proporciona de forma indefinida utilizando criterios de explotación y uso sostenible. Así, se valoraron los océanos, las zonas costeras, aguas continentales, suelos agrícolas y pastos, zonas áridas y desiertos, zonas de alta montaña y espacios naturales protegidos a través de los distintos servicios que proporcionan al hombre.

Con la información proporcionada en el proyecto VANE y los escenarios de cambio climático planteados en el apartado 4.1 se ha hecho una primera estimación de las consecuencias económicas de la inundación sobre los ecosistemas costeros del Cantábrico y Noratlántico, intentando percibir cuál es la dimensión del problema y dónde está la prioridad de actuación en cuanto a conservación y protección de los recursos naturales. El problema se reduce ahora a valorar un flujo monetarizado de servicios que se espera percibir en el futuro $q(t)$. Para ello, la economía emplea la suma de valores actualizados o suma descontada a una tasa de descuento r . Dicha tasa de actualización actúa como instrumento amortiguador del valor, reflejando el hecho de que valores a percibir en el futuro han de tener menos peso que valores a percibir de inmediato (a igualdad de valor y riesgo). El valor de la tasa de descuento es una fuente de controversia especialmente en el mundo de la economía de los recursos naturales. En este caso proponemos trabajar, siguiendo las recomendaciones de la literatura, con una tasa decreciente de $r=3\%$ considerando un plazo horizonte de 50-100 años.

La pérdida de servicios ambientales puede ser causada por la pérdida de ecosistemas debido a la subida del nivel del mar (inundación permanente) o a su destrucción como consecuencia de un evento catastrófico de inundación. En ambos casos la pérdida de servicios o del ecosistema o hábitat en sí no será siempre total y permanente. En el caso de inundación permanente, a medida que van desapareciendo las condiciones óptimas para la supervivencia de un determinado ecosistema, otros van colonizando y ocupando ese nicho ecológico, de manera que un ecosistema se sustituye por otro, cambiado así los flujos y servicios ambientales proporcionados. Además, ecosistemas como los humedales tiene a veces la capacidad de migrar hacia el interior colonizando e inundando nuevas zonas donde poder mantener las características del humedal. De esta manera, los servicios prestados por parte del humedal pueden verse algo alterados, pero se mantendrán en gran medida, siendo las pérdidas efectivas las generadas en el ecosistema terrestre afectado por la expansión de los humedales. Por otro lado, cuando se produce un evento catastrófico de inundación que da lugar al daño o pérdida de parte del ecosistema los servicios prestados disminuyen o cesan a partir del evento. Sin embargo, la resiliencia natural del ecosistema, que le permite soportar la presión del evento catastrófico, hace que el sistema natural se vaya recuperando poco a poco y prestando de nuevo los servicios ambientales propios de sus características. Si

quisiéramos tener en cuenta la capacidad de adaptación del ecosistema frente al cambio climático a la hora de estimar los daños económicos la manera de proceder sería diferente. La Figura 46 muestra un gráfico que ilustra la complejidad del problema.

En primer lugar habría que estimar la evolución futura de la productividad del activo natural a la vista de los cambios introducidos en el sistema introduciendo δq_t (asumimos un deterioro progresivo del activo), de esta forma, la curva (1) nos presenta el impacto que cabría prever para los eventos extremos con la información disponible hasta el momento.

En segundo lugar, introducimos el impacto del cambio climático sobre el activo produciendo en general dos efectos distintos, por un lado se ve alterada su productividad media, lo que se hace visible en la curva (2), reduciéndose en un escalón irre recuperable y alterándose su pendiente por empeorar su evolución temporal.

En tercer lugar, nos enfrentamos a una exposición distinta a eventos extremos y esta distinción será observable en la severidad de los mismos (3), en la duración creciente de los impactos (4) en el aumento del daño no recuperable (5), en la duración del proceso de recuperación a corto plazo (6), y en la evolución en el tiempo del plazo de recuperación necesario (7) que presumiblemente se alargará fruto de la eventual pérdida de resiliencia del mismo.

Con este esquema conceptual es posible captar el impacto sobre vulnerabilidad y resiliencia, y quedan indicadas las líneas de investigación que requiere el análisis cuantitativo del impacto del cambio climático.

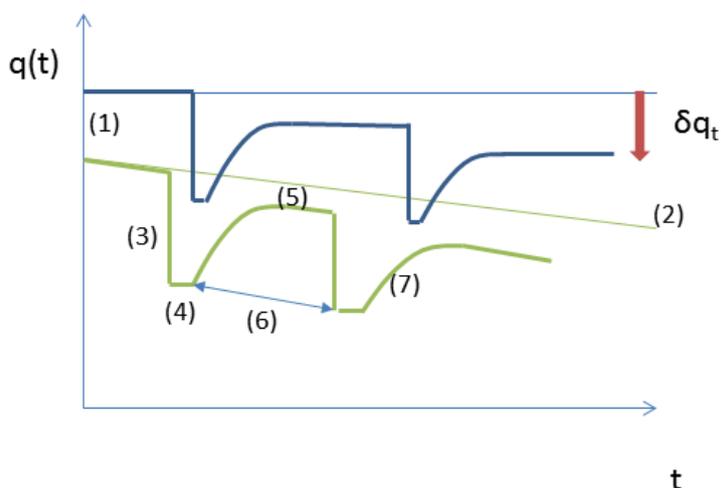


Figura 46. Esquema de la evolución de la producción de un activo natural sometido a cambio climático.
Fuente: IH Cantabria.

Sin embargo, ante la falta de consenso en este ámbito por parte de la comunidad científica, el daño económico estimado en este estudio no contempla la capacidad de adaptación natural de los ecosistemas dándose una cota superior del daño. Es decir, la

pérdida estimada para, por ejemplo, un evento extremo de inundación sería la pérdida económica ante el cese total de los servicios prestados por el ecosistema, sin tener en cuenta que esos servicios podrían restablecerse a lo largo del tiempo.

Si a día de hoy tuvieran lugar los escenarios de subida de nivel del mar proyectados para el año 2100 (C1 a C3), los servicios ambientales afectados por la inundación permanente derivada de la subida del nivel del mar supondrían del orden de millones de euros, que expresado en porcentaje del PIB de 2008 oscilaría, dependiendo de la provincia y el escenario, entre el 0,0001% en Vizcaya y hasta el 0,013% en Cantabria. Hay que destacar aquí que el indicador VANE utilizado no responde a un comportamiento económico típico, sino que muestra una "foto" homogénea de la valoración de los servicios ecosistémicos por lo que no hay que fijarse tanto en el valor absoluto de la afección sino en la comparativa y la variabilidad espacial que muestra. Como puede verse en la Figura 47 (izquierda) existe una importante variabilidad en los servicios ecosistémicos afectados a lo largo de la costa norte española. Cantabria se presenta como la provincia más afectada, donde la afección sobre los servicios prestados por los ecosistemas representa valores en el entorno del 0,008 % del PIB de la provincia en 2008 para los dos primeros escenarios y del 0,011 % para el escenario 3 (una subida de nivel del mar global de 2 m, poco probable pero posible). Sin embargo, provincias colindantes como Asturias y Vizcaya presentan una afección considerablemente menor, en el caso de Vizcaya de dos órdenes de magnitud menos. La diferencia entre las configuraciones de la costa, Vizcaya más escarpada y con menor longitud mientras que Cantabria cuenta con numerosos estuarios y rías de gran valor ambiental, puede originar la diferencia entre la valoración ambiental de una y otra provincia. Coruña, con numerosas rías, vería sus recursos naturales afectados valorados en el entorno del 0,002 % del PIB de la provincia en 2008. En el caso de Guipúzcoa podemos comprobar que ante los tres escenarios de inundación la pérdida de servicios naturales es similar y se encuentra en el entorno del 0,0015 % del PIB de 2008. Por otro lado, el aumento del nivel del mar originará mayores eventos extremos de inundación que también dañarán y afectarán a los servicios ecosistémicos, de manera adicional a lo estimado en la Figura 47 izquierda. El indicador utilizado para estimar los daños por inundaciones extremas ha sido la inundación que ocurre una vez por término medio cada 50 años (es decir, la inundación excepcional que podríamos tener hasta 2 veces a lo largo del siglo XXI) y los servicios afectados se muestran en la Figura 47 derecha en términos de porcentaje sobre el PIB de cada provincia en 2008. Sobre los daños anteriormente comentados, habría que tener en cuenta, que de forma eventual, dos veces en lo que resta de siglo podríamos tener nuevos servicios ambientales afectados, representando entre el 0,001 y el 0,0035 % del PIB de 2008 en Pontevedra, Coruña y Cantabria.

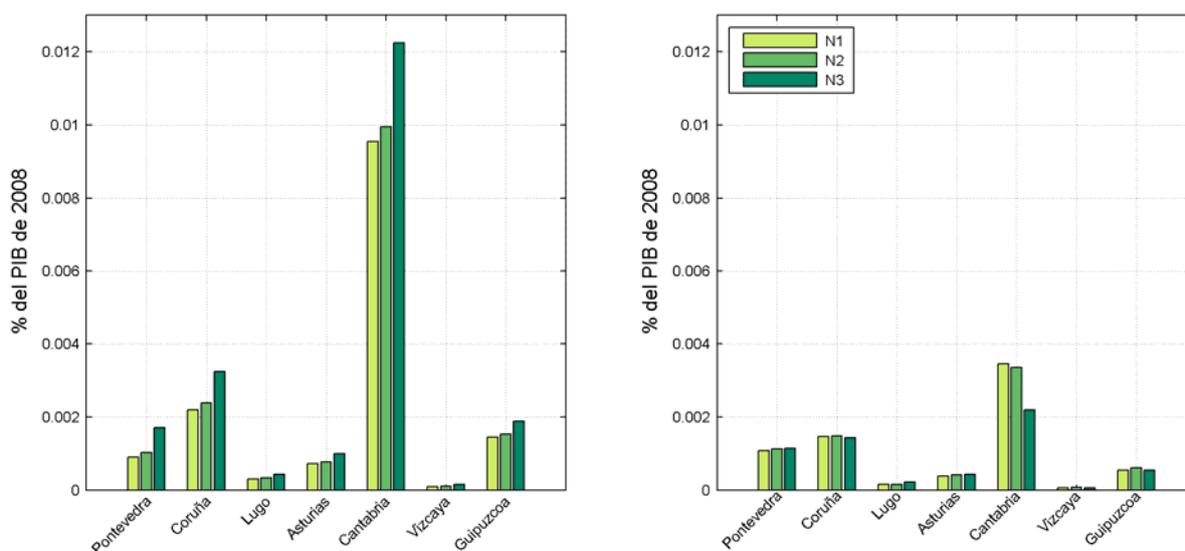


Figura 47. Servicios ambientales prestados por los ecosistemas afectados por inundación permanente (izquierda) y eventos extremos de inundación (derecha) en términos de % sobre el PIB de 2008 de cada provincia, para los escenarios C1 a C3 en el año 2100. Fuente: IH Cantabria.

Los daños estimados para los escenarios propuestos en 2100 nos dan una visión del alcance de los daños del cambio climático sobre los ecosistemas. Sin embargo, la evaluación de los daños para un horizonte más cercano, como es el año 2040, en el que se presenta un escenario en el que suponemos que el nivel del mar seguirá subiendo como se ha observado hasta ahora nos permitirá tener en mente una idea más realista de los posibles daños y las prioridades de actuación. En la Figura 48 se muestra la valoración en % sobre el PIB de 2008 de cada provincia del valor total de los servicios naturales afectados por la inundación permanente causada por la subida del nivel del mar (izquierda) y además el valor total afectado por el evento de inundación correspondiente a 50 años de período de retorno (derecha) en el año 2040. En ambos casos el valor monetario se ha actualizado a su valor presente con una tasa de descuento del 3%. Este descuento nos trae a fecha presente el valor de las pérdidas que ocurrirán a mediados de siglo y que, por lo tanto, para la sociedad actual tendrán menos peso que un evento catastrófico ocurrido en la actualidad. Nuevamente Cantabria es la provincia más afectada, con servicios dañados por inundación permanente valorados en hasta el 0,12 % de su PIB en 2008. Coruña y Guipúzcoa son las siguientes provincias más afectadas, con daños del 0,02 % de su PIB de 2008 mientras que Lugo y Vizcaya son las menos afectadas. A estos daños habría que sumar los ocurridos por inundaciones catastróficas una vez cada 50 años, lo que supondría para Cantabria una afección equivalente a un valor del 0,14 % de su PIB de 2008 en servicios ambientales afectados.

Estos valores obtenidos para el año 2040 nos indican unos daños ambientales valorados en cientos de millones de euros, siendo especialmente sensible la provincia de Cantabria, con un daño mucho más elevado sobre los servicios ambientales que las demás.

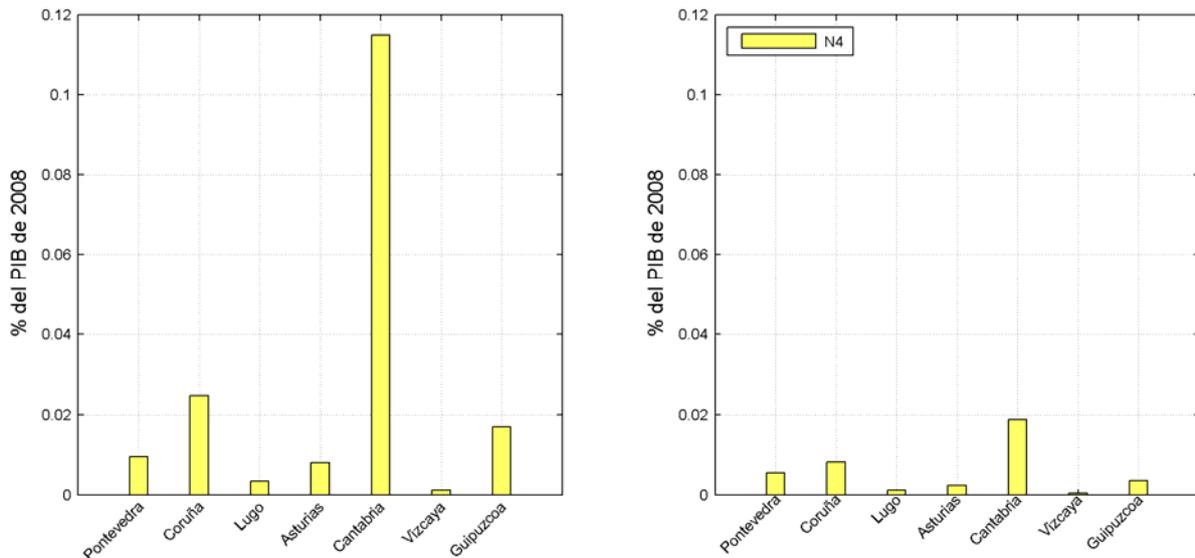


Figura 48. Pérdida de servicios ambientales prestados por los ecosistemas debido a inundación permanente (izquierda) y eventos extremos de inundación (derecha) para el escenario C4, en el año horizonte 2040. Fuente: IH Cantabria.

En estos resultados no hay que olvidar que no estamos considerando la adaptación natural de los ecosistemas ante presiones climáticas, por lo que estaríamos dando una cota superior del daño. Sin embargo, también hay que tener en cuenta que sólo se está valorando aquí la pérdida de servicios por el aumento de nivel del mar y no se están incluyendo otros efectos del cambio climático como el aumento de la temperatura del agua del mar, las olas de calor, las sequías o los cambios en el régimen de precipitaciones.

6.2.3. Pérdida potencial de praderas de *Posidonia oceanica*

La *Posidonia oceanica* es una planta endémica del Mar Mediterráneo de alto valor ecológico que genera una gran biodiversidad al servir de hábitat a numerosas especies, protege la costa frente a la erosión y actúa como importante sumidero de carbono, siendo éstos algunos de los principales servicios ecosistémicos que proporciona. Debido a la importancia de este ecosistema característico de nuestras costas y su vulnerabilidad frente al cambio climático en este apartado se resumen los resultados y conclusiones obtenidos en el estudio de Jordà et al. (2012b) donde se analiza el impacto causado por el aumento de la temperatura superficial del agua del mar sobre las praderas de *Posidonia* bajo distintos escenarios de cambio climático.

El principal factor de riesgo natural para la *Posidonia* es el aumento de la temperatura superficial del agua del mar como consecuencia del calentamiento global. La *Posidonia* es muy sensible a incrementos en la temperatura del mar, pues al superarse los 28°C las tasas de mortalidad se disparan. Además, no solo es sensible a la superación de este

umbral, sino también a la duración de las olas de calor, es decir, al aumento en la duración de los períodos de temperaturas anómalamente cálidas. Un estudio de Jordà et al. (2012b) recientemente publicado en la revista *Nature* muestra la alta sensibilidad de la *P. oceanica* al aumento de la temperatura superficial del agua del mar: la tasa de mortalidad aumenta en tres veces con un incremento de 3°C en la temperatura máxima anual del agua. El estudio muestra los cambios en la densidad de las praderas a lo largo del siglo XXI en el entorno de las Islas Baleares para el aumento de la temperatura superficial del mar proyectada en el escenario de cambio climático A1B (SRES, IPCC). Si se cumplieran los cambios proyectados para este escenario la temperatura del mar en verano en el Mediterráneo occidental sufriría un aumento medio de $3,4 \pm 1,3^\circ\text{C}$ a finales de siglo. Además, también aumentaría el número de eventos extremos de aguas calidas durante este siglo produciéndose 3 eventos cada cuatro años para el período 2025-2050 (lo que significa tres veces la frecuencia actual) y la intensidad de estas olas de calor con respecto al presente. Bajo estas condiciones de temperatura la densidad de las praderas de *Posidonia* disminuiría hasta alcanzar el 10% de la densidad actual a mediados de este siglo (2049 \pm 10 años).

Sin embargo, no hay que olvidar que otro factor importante de riesgo para la *Posidonia* son las presiones antrópicas sobre el mar Mediterráneo como el deterioro en la calidad de las aguas y los sedimentos debido a los vertidos con exceso de nutrientes y compuestos orgánicos o los impactos mecánicos generados por las anclas de las embarcaciones que fondean en estas aguas. Estas alteraciones locales también producen el deterioro de los campos de *Posidonia* habiéndose observado una tasa de mortalidad del 7% al año en la región Balear antes de 2000, cuando la temperatura del mar no superaba los $25,7^\circ\text{C}$ y no se tenía una evidencia clara del aumento de la mortalidad como consecuencia del aumento en la temperatura del agua. Si no se produjera el calentamiento de las aguas, las praderas de *Posidonia* alcanzarían el 10% de la densidad actual en el año 2093 (\pm 12 años) es decir, el cambio climático avanzaría en 44 años la pérdida funcional de los campos de *P. oceanica* en las Islas Baleares (Jordà et al. 2012b).

Los organismos y sistemas naturales tienen una capacidad adaptativa natural frente a cambios en las condiciones climáticas o presiones externas. Sin embargo, el crecimiento tan lento de la *Posidonia* y su reproducción dispersa limitan su capacidad adaptativa. Por este motivo, es necesaria la toma de medidas, tanto de adaptación como de mitigación, para conservar esta especie milenaria de tan alto valor. En los últimos años ya se han intentado llevar a cabo medidas para disminuir los efectos de las presiones antrópicas, como por ejemplo la instalación de boyas de fondeo diseñadas específicamente para evitar los daños en la *Posidonia* por las anclas de las embarcaciones. Sin embargo, las acciones encaminadas a disminuir el aumento de la temperatura superficial del mar pasan por acciones globales de mitigación reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero.

6.3. Evaluación de las consecuencias sobre el sistema socioeconómico

Como ya hemos visto hasta el momento, el sistema socioeconómico en España tiene un importante peso en la costa, y según las tendencias observadas en los últimos años, este comportamiento se acentúa cada vez más. La migración de la población hacia la costa, el desarrollo urbanístico y boom inmobiliario de los últimos años y el turismo de sol y playa hacen de la franja costera española un sistema muy vulnerable frente a los efectos del cambio climático. Además, la apuesta por la construcción de grandes puertos en la costa española y el desarrollo de estas vías de transporte también da lugar a un aumento de la vulnerabilidad de estas infraestructuras frente al cambio climático.

Sin embargo, hasta ahora no se conocen las consecuencias que el cambio climático podría tener en la costa sobre los puertos, la población, riqueza, inversiones o flujo de servicios generados. Esta información resultará imprescindible para la toma de decisiones y determinación de políticas, estrategias y medidas de adaptación eficientes en el futuro. La sociedad que conocemos, construida a lo largo de los años, se va a ver abordada por un proceso de cambio de una dimensión sin precedentes y va a tener mucho menos tiempo para redefinir su relación con el medio del que tuvo para implantarse como hoy la conocemos. Es al servicio del análisis de esta incertidumbre futura para lo que hemos abordado, en este capítulo, el estudio del impacto de los cambios en la dinámica costera derivados del cambio climático sobre la operatividad y fiabilidad en los puertos y sobre el tejido económico, para el caso de inundación permanente y aumento de los eventos extremos de inundación. Es decir, vamos a intentar responder a las preguntas planteadas de ¿cuál es la dimensión del problema? y ¿Cuáles son las prioridades de actuación?

En el análisis referido a los puertos la evaluación de las consecuencias se va a hacer a través de indicadores de operatividad y fiabilidad. El número de horas que un puerto dejará de ser operativo puede traducirse en actividad económica afectada. En cuanto a la pérdida de fiabilidad, la necesidad de recrecer las obras de abrigo, como por ejemplo aumentar la cota de los diques o aumentar el peso de las piezas, puede traducirse directamente en una consecuencia económica. Por otro lado, la pérdida de fiabilidad sin llegar al fallo de la estructura implicará también una pérdida en la operatividad y por lo tanto, nuevamente, una repercusión en la actividad económica.

En cuanto al estudio planteado sobre las consecuencias sociales y económicas, se va a desarrollar a nivel provincial para Galicia y la costa Cantábrica, donde se dispone de los datos a alta resolución necesarios para cumplir el objetivo.

6.3.1. Pérdida de operatividad y fiabilidad en puertos

Ya se ha destacado la situación estratégica que tiene España dentro de las principales rutas marítimas del mundo y el papel crucial que tienen los puertos en España. La mayor parte de las exportaciones (cerca del 60%) e importaciones (85%) de mercancías entran y salen por los principales puertos de interés de España (Puertos del Estado).

Los puertos, como infraestructura costera singular, reúnen una serie de particularidades que las hacen especialmente relevantes. Su vida útil es larga, en muchas ocasiones superando los 50 años, lo que los hace especialmente sensibles a los cambios futuros del clima: ascenso del nivel del mar, variaciones en marea meteorológica, oleaje y viento extremo e inundaciones fluviales. Por otro lado, las operaciones portuarias también pueden verse afectadas por las condiciones climáticas y, en consecuencia, pueden producirse retrasos en la actividad comercial del puerto, además de ser vulnerables a cambios económicos en el mercado global derivados del cambio climático.

Los efectos originados directa e indirectamente por el cambio climático darán lugar a una serie de impactos sobre los puertos con unas consecuencias económicas derivadas. Los impactos directos, generados por los cambios en las variables climáticas, estarán más relacionados con las infraestructuras, servicios y operaciones del puerto, mientras que los impactos indirectos estarán más relacionados con los tráficos de mercancías, área de influencia del puerto y el propio desarrollo futuro del puerto. Este estudio se ha centrado principalmente en los impactos directos sobre las infraestructuras de protección. La tipología de estructuras de protección, los modos de fallo y las acciones sobre ellas son muy diversos aunque, con generalidad, el aumento del nivel del mar y el cambio en las condiciones de oleaje supondrán una disminución del nivel de seguridad para el cual fueron proyectadas. Igualmente, las condiciones de protección para las operaciones planificadas a su resguardo se verán modificadas de acuerdo con los cambios en las acciones originales de diseño.

Operatividad

El concepto de operatividad en puertos hace referencia al tiempo que un puerto dispone para llevar a cabo sus operaciones de entrada de buques, carga y descarga de mercancías. Varios son los factores físicos que pueden hacer que un puerto deje de ser operativo, entre ellos: el viento, el rebase sobre las obras de defensa, las corrientes o la agitación interior por efectos de onda larga. Evaluar las condiciones límite de los distintos factores que implican la parada del puerto es una tarea compleja y específica para cada puerto. Por la escala del estudio no es posible llegar a un análisis tan detallado del problema, por lo que esta cuestión se va a analizar teniendo en cuenta tan solo el oleaje en el exterior de los puertos. Por tanto, sí que es posible contemplar las situaciones en las que el puerto no sea operativo por problemas de acceso a él debido a las condiciones de oleaje reinantes. Además, también se puede evaluar, a modo de comparación entre los distintos puertos, según las dinámicas que se presenten en cada localización, cuál sería el rebase actual y en el futuro sobre un dique tipo, que se ha considerado igual en todos los puertos.

Siguiendo las Recomendaciones para Obras Marítimas del Ministerio de Fomento del Gobierno de España (ROM 3.1) como marco de referencia para obtener valores generales y conservadores, las condiciones del clima marítimo que se consideren límites de operación se determinarán en función del nivel de servicio que se desee obtener. A falta de estudios específicos se recomienda utilizar las siguientes condiciones climáticas

(transversales al buque), que son las que se consideran normalmente para el dimensionamiento de las zonas de acceso a puerto:

- Velocidad absoluta del viento $V_{10} \leq 10$ m/s (20 nudos)
- Velocidad absoluta de la corriente $V_c \leq 0,50$ m/s (1 nudo)
- Altura de la Ola $H_s \leq 3$ m

El valor tomado como límite de operación es $H_s \leq 3$ m. El alcance de este estudio no permite valorar las condiciones de oleaje en el interior de cada puerto, por lo que las condiciones de navegabilidad están referidas a la bocana (acceso al puerto). El estudio de las condiciones de navegabilidad en los últimos sesenta años y su extrapolación a la primera mitad del siglo XXI muestran una disminución en las condiciones de navegabilidad en los puertos del Cantábrico, Golfo de Cádiz y oeste del Mar de Alborán para el año 2040 por un 15-20 % más de altura de ola mayor o igual a 3 m (Figura 49). En la mayor parte de la cuenca Mediterránea se espera un incremento en las condiciones de navegabilidad. Para el año 2040 se estima una disminución de las horas de superación de altura de ola mayor o igual a 3 m del 20-30 %, llegando a disminuciones del 80-90 % en la bahía de Almería, Cartagena o el sur del Delta del Ebro. Las Islas Baleares presentarán un incremento de la navegabilidad en torno a un 20 %, mientras que en las Islas Canarias los cambios son más variados, esperando un incremento en la navegabilidad en el noroeste de las islas (hasta el 80 % en el oeste de Tenerife) y una ligera disminución en ciertos puntos de la cara suroeste de las islas, para el año 2040.

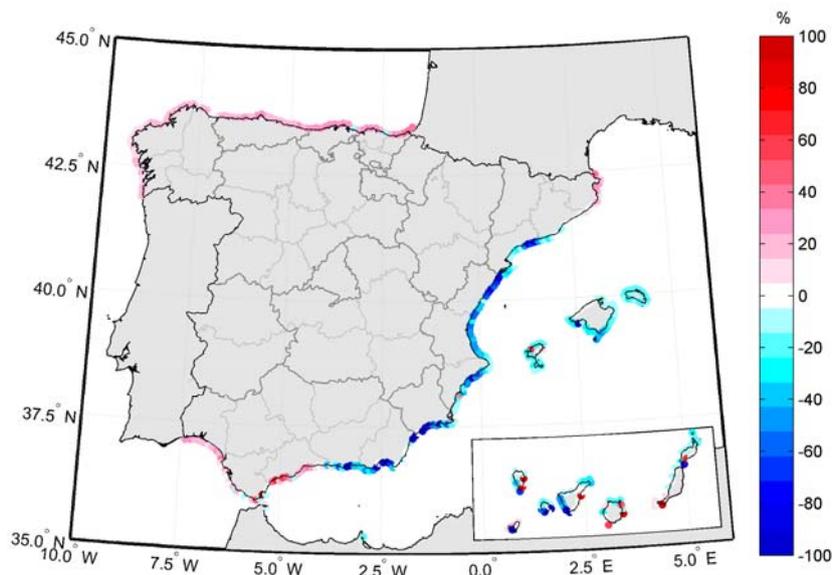


Figura 49. Porcentaje de cambio en el tiempo de superación de 3 m de altura de ola (cambio en las condiciones de navegabilidad) para el año 2040. Fuente: IH Cantabria.

Otra variable para evaluar la inoperatividad de un puerto puede ser un rebase excesivo sobre los diques que protegen el área de agua abrigada donde se desarrollan las actividades portuarias. Para la evaluación del rebase se ha tomado un hipotético dique vertical de características homogéneas en todo el litoral español, de forma que se comparan los distintos efectos de las dinámicas y las tendencias para la misma estructura en igualdad de condiciones en distintos puntos de la costa de estudio. Los cambios en el rebase podrán estar originados por el ascenso del nivel del mar o por cambios en el oleaje. La Figura 50 muestra el porcentaje de cambio estimado en el rebase para el año 2040, en base a los datos históricos. Como se puede ver el incremento en el rebase originado por la subida del nivel del mar es del orden del 5 % en la mayor parte de la Península Ibérica e Islas Baleares, llegando a aumentos del 20-25 % en el sureste de las Islas Canarias. En cuanto al rebase originado por el oleaje se estima un aumento en torno al 30-40 % en el Cantábrico y cara este de las Islas Canarias. Huelva, el oeste del Mar de Alborán y el norte de la Isla de Mallorca también sufrirán un aumento en el entorno del 20 %. Sin embargo en la zona del Golfo de Cádiz próxima al Estrecho y en la mayor parte de la cuenca mediterránea peninsular se estima una disminución del rebase del 30-50 % según zonas para el año 2040 con respecto a los últimos 60 años.

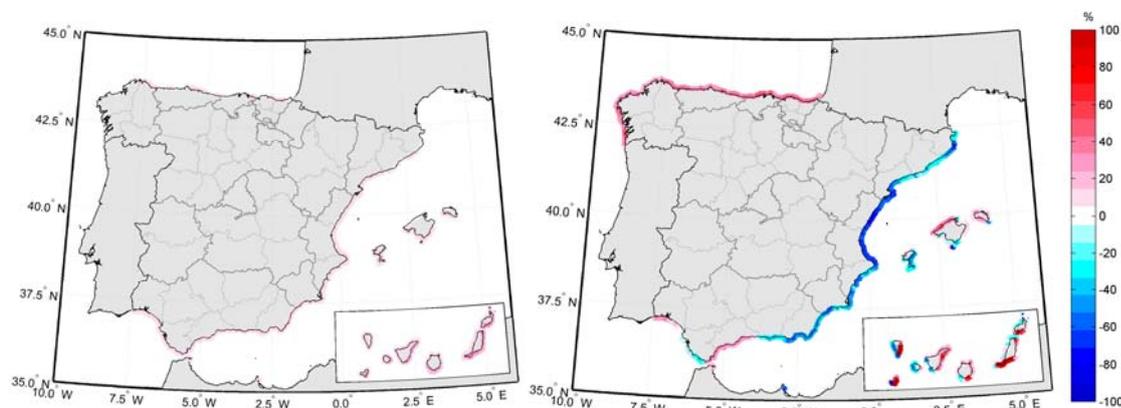


Figura 50. Porcentaje de cambio en el rebase causado por el nivel del mar (izquierda) y por el oleaje (derecha) para el año 2040. Fuente: IH Cantabria.

Fiabilidad

El concepto de fiabilidad hace referencia a las condiciones de diseño de la estructura. Representa el fallo de una obra de defensa portuaria por verse superadas las solicitaciones de cálculo. El objetivo de este análisis es ver cómo se ve afectada la fiabilidad de los puertos existentes debido al cambio climático, considerando el modo de fallo por superación de la altura de ola significativa de cálculo y por superación de un determinado nivel del mar de diseño.

Al tratarse de un estudio a escala nacional, al igual que en el caso de inundación, lo que se pretende es identificar zonas especialmente susceptibles de que, en el caso de que

exista un puerto, éste vea afectada su fiabilidad como consecuencia del cambio climático. El cambio que debieran experimentar las piezas del manto exterior un dique en talud debido al aumento del nivel del mar o de la altura de ola para mantener el nivel de diseño (la estabilidad) se utiliza como indicador del impacto sobre la fiabilidad de las obras de defensa. De esta manera, utilizando un indicador sencillo para una única tipología de dique podemos comparar las condiciones de fiabilidad a lo largo del litoral español en los últimos sesenta años y estimar el cambio al año 2040. La Figura 51 muestra el porcentaje de cambio en el peso de las piezas para conservar la estabilidad de diseño al año 2040. Se estima que la subida del nivel del mar al año 2040 suponga la necesidad de aumentar ligeramente (entorno a un 2 % en el litoral peninsular y balear y un 3 % en las Islas Canarias) el tamaño de las piezas de dique en talud para mantener la estabilidad de diseño. Sin embargo, los cambios en el oleaje suponen cierta pérdida de estabilidad en la parte oriental de Asturias, las rías bajas, el oeste del Mar de Alborán y la parte oriental de las Islas Canarias (aumentos del 10-20 % del peso de las piezas), pero favorecen la estabilidad de dique en talud en la costa norte gallega y gran parte del litoral mediterráneo.

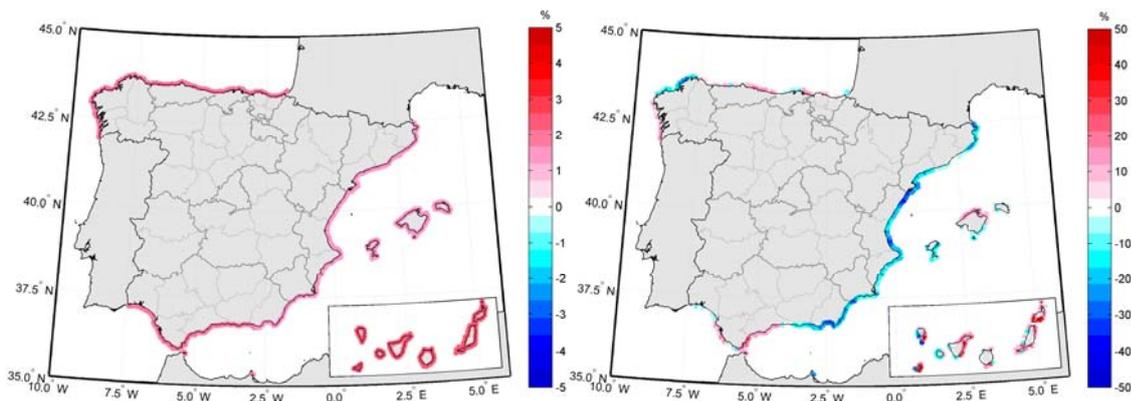


Figura 51. Porcentaje de cambio en el peso de las piezas de dique en talud debido a la subida del nivel del mar (izquierda) y al oleaje (derecha) para el año 2040. Fuente: IH Cantabria.

6.3.2. Consecuencias sociales del cambio climático en la costa del Cantábrico

Utilizando la base de datos de población de la Fundación BBVA y los escenarios de inundación y tendencias demográficas correspondientes a los años horizonte 2100 y 2040 se ha obtenido la población (en términos de porcentaje referido al censo de 2008) expuesta a inundación permanente y a eventos extremos. Hay que señalar aquí que los resultados muestran un indicador de la exposición/susceptibilidad actual de la población, puesto que ante un escenario cierto de subida de nivel del mar es de suponer una reubicación de los asentamientos urbanos, movimientos de la población, etc.

Como ya se señaló en la sección 6.1.3 hay una serie de incertidumbres y limitaciones a tener en cuenta en el análisis. En concreto, para la estimación de las consecuencias

sobre la sociedad, hay que tener en cuenta la diferencia de resolución existente entre la base de datos de población (1000 m) y el modelo digital del terreno (5 m), que da lugar a una mayor estimación de la población afectada. Esta limitación se ha intentado solventar llevando las celdas de la malla de población a la misma resolución que el modelo digital del terreno, repartiendo la población homogéneamente en cada una de ellas. Esta aproximación ha permitido disminuir la sobrestimación de la población afectada, pero asume un reparto espacial de la población que no tiene por qué corresponderse con la realidad. Es, por tanto, que los resultados deben interpretarse como un indicador de las consecuencias sociales del cambio climático en la costa Cantábrica en caso de no incorporar medidas de adaptación.

La Figura 52 muestra el porcentaje de población expuesta a inundación permanente (panel izquierdo) y a eventos extremos de inundación (panel derecho) para los tres escenarios de cambio climático al año 2100. En este caso (sin considerar aumento en la población), lo que nos indica es que, si la sociedad actual sufriera los escenarios de inundación propuestos, Cantabria y Guipúzcoa serían las provincias con mayor población expuesta, sobrepasando el 10% de población afectada para el caso de eventos extremos en Cantabria.

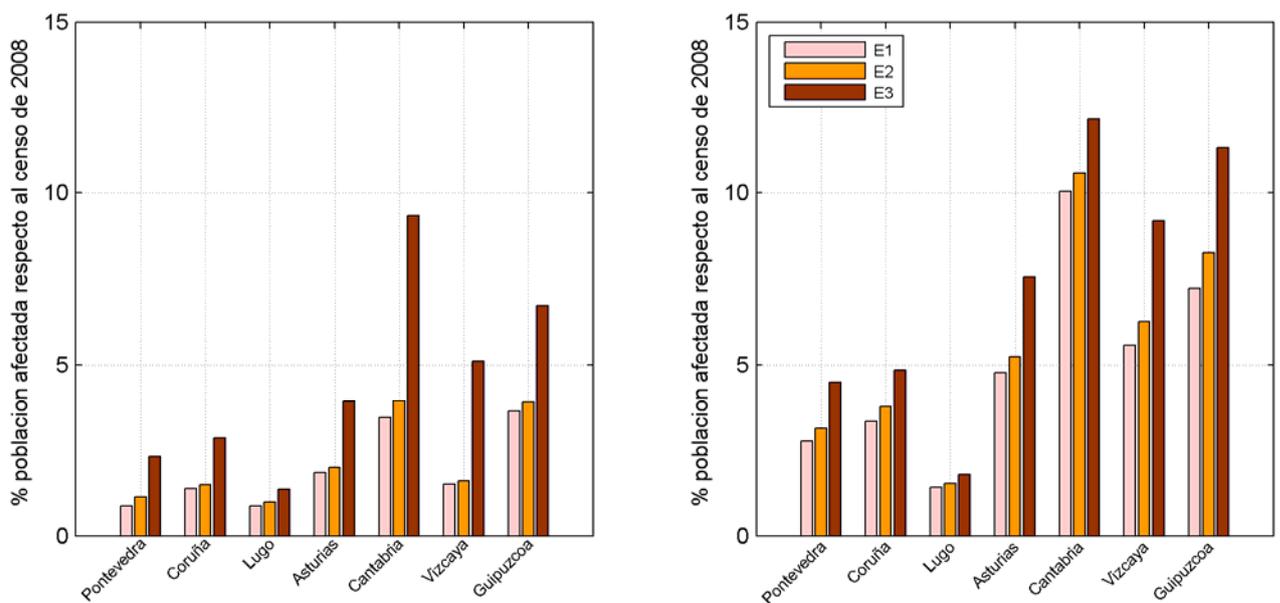


Figura 52. Porcentaje de población (referido al censo de 2008) expuesta a inundación permanente (panel izquierdo) y a eventos extremos de inundación (panel derecho) para los escenarios E1 a E3 en el año horizonte 2100. Fuente: IH Cantabria.

La Figura 53 muestra el porcentaje de población expuesta a inundación permanente (panel izquierdo) y a eventos extremos de inundación (panel derecho) para el año horizonte 2040, escenario en el que se considera la tendencia demográfica de los últimos años sin medidas específicas de adaptación. En este caso se observa como Cantabria,

Guipúzcoa, pero también Coruña presentan el mayor porcentaje de población expuesta frente a inundación permanente, en torno al 2-3 %. En el caso de eventos extremos de inundación Vizcaya presenta más del 4 % de la población afectada, similar a Coruña y Asturias, mientras que Cantabria presenta hasta un 9 % de su población expuesta.

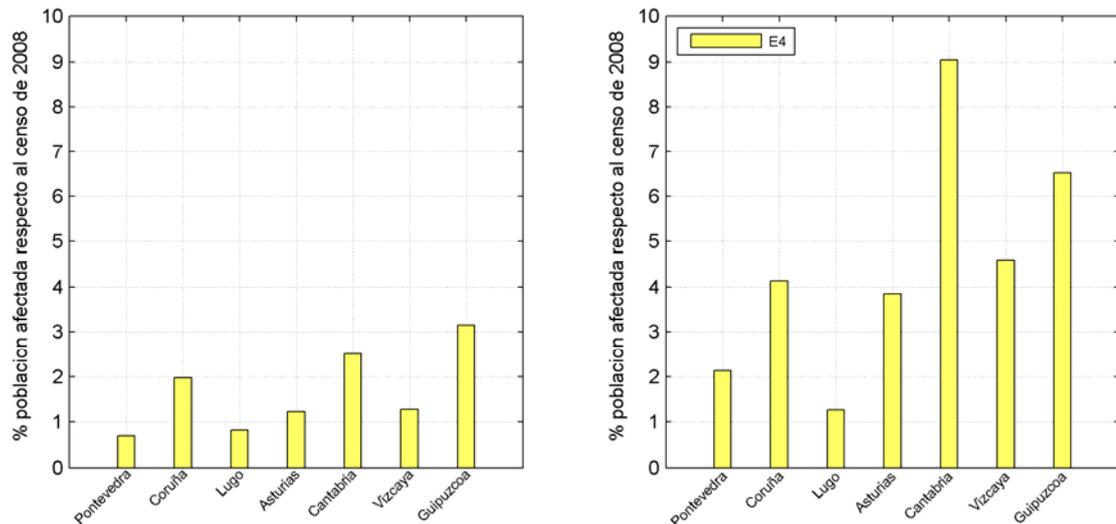


Figura 53. Porcentaje de población (referido al censo de 2008) expuesta a inundación permanente (panel izquierdo) y a eventos extremos de inundación (panel derecho) en el año horizonte 2040, considerando evolución de la población en ausencia de medidas de adaptación. Fuente: IH Cantabria.

6.3.3. Dimensión y prioridades de actuación de las consecuencias económicas del cambio climático en la costa del Cantábrico

A lo largo de este apartado se responde paralelamente a las preguntas sobre la dimensión del problema y las prioridades de actuación frente a las consecuencias del cambio climático en la costa, en términos de prioridades temporales, es decir, cuándo tenemos que actuar, y de prioridades espaciales, dónde tenemos que actuar.

Respecto de la primera cuestión que se ha planteado, *dar una estimación de la dimensión del cambio climático*, hemos calculado que, si la sociedad actual se viera enfrentada a la afección máxima considerada para el año 2100, el valor acumulado de la actividad económica futura, medido a través del PIB acumulado que se vería afectado permanentemente, alcanzaría cifras elevadas¹. Esta cifra se distribuiría irregularmente

¹ De nuevo recalcamos que esta cifra no constituye un pronóstico de daños sino una cuantificación de la actividad sobre la que hemos de actuar, ya que no contempla ni procesos de adaptación ni de aprendizaje por parte de la sociedad.

entre las provincias costeras tal y como se observa en el resto de casos, siguiendo como criterio de reparto el PIB_{pc} (per capita) de la población residente en las áreas afectadas, a causa tanto de la diferente interacción con la dinámica costera como de la diferente implantación espacial de los núcleos residenciales que soportan la actividad socioeconómica. En términos relativos, representaría cifras sustanciales del PIB anual según las provincias. Hay que tener en cuenta que este resultado se deriva de someter el territorio a una prueba extrema, puesto que anticipamos en 100 años el impacto del cambio climático y aunque como contrapartida ensayamos la situación económica actual, predomina el efecto anticipación del cambio y proporciona una imagen pésima de la situación vista desde el presente. Sin embargo, no debemos olvidar que esa situación es la que será vivida por las generaciones para las que constituirá su presente dentro de 100 años. Podemos comprobar cómo en términos absolutos las provincias más expuestas son Vizcaya y Guipúzcoa, y por el contrario en términos relativos Cantabria emerge como la región más expuesta en términos de PIB acumulado afectado, situándose Lugo, Coruña y Pontevedra como las menos afectadas.

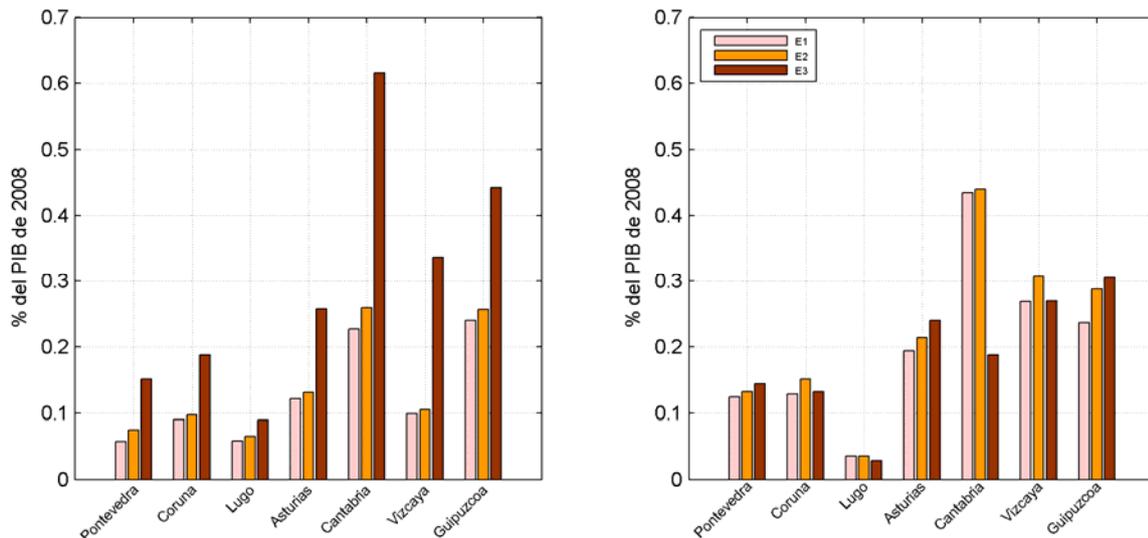


Figura 54. Valor en el año 2100 del PIB afectado en el caso de inundación permanente (panel izquierdo) y eventos extremos de inundación (panel derecho) en términos de porcentaje sobre el PIB de cada provincia en 2008 para los escenarios E1 a E3. Los valores han sido actualizados al presente ($r=3\%$). Hipótesis de crecimiento PIB (0%). Fuente: IH Cantabria.

Podemos comprobar que estas magnitudes alcanzan valores de entre mil y ocho mil millones de euros, que representan en torno al 0,05 y 0,6 % del PIB de 2008 de cada provincia, de nuevo irregularmente distribuidos según las regiones, como se puede ver en la Figura 54.

Del análisis de estos dos valores, podemos extraer dos conclusiones. Por un lado, contamos con una estimación del sobre coste asociado a la aceleración de los efectos del cambio climático, estimando los sobre costes asociados a eventuales acortamientos de los plazos de reacción que se derivan del avance de resultados en los estudios climáticos.

Por otro lado, de la comparación entre la valoración de la desafección al PIB futuro en el caso de inundación permanente según se añada o no el impacto de eventos meteorológicos extremos, podemos concluir que la aportación de los eventos extremos puede llegar a duplicar la actividad económica afectada. La Figura 54 derecha muestra la afección total “extra” causada por el evento extremo de 50 años de período de retorno, donde se puede ver que es especialmente relevante para los escenarios E1 y E2 en Cantabria y Vizcaya, por encima de la afección causada para el escenario E3. Esto es debido a que en el escenario E3 la mayor parte de los activos expuestos se han visto afectados por inundación permanente y son pocos los que quedan afectados por el evento extremo, sin embargo, en los escenarios E1 y E2 el evento extremo afecta a gran parte de esos activos expuestos a inundación permanente en el escenario E3. Hay que matizar este resultado ya que la inundación permanente supone un evento irreversible, mientras que la afección por eventos extremos afecta a la riqueza medida de forma más esporádica. Nuestro indicador simplemente caracteriza la actividad económica vulnerable ante dichas situaciones sin especificar el grado de vulnerabilidad.

Finalmente se hace patente, en este momento, el compromiso en el que nos encontramos y el impacto del proceso de descuento adoptado, ya que como consecuencia de haber elegido una tasa de descuento del 3%, por cada euro medido hoy esperamos ahorrar daños de 20 euros dentro de 100 años.

$$(1 + 0,03)^{100} \approx 20 \quad (6)$$

En consecuencia si evaluamos por su valor presente una medida cuya contribución al bienestar futuro es de 1 euro, estaremos realmente resolviendo un problema 20 veces mayor a una sociedad futura que será, eso sí, más rica y tendrá más tiempo para prepararse.

Un resultado más realista se observa si analizamos el impacto previsible derivado de la extrapolación de las tendencias climáticas y económicas pasadas durante los próximos 40 años (Figura 55). En este caso comprobamos que el impacto medio anual de la inundación esperable medido por el valor actualizado de la corriente de PIB afectado durante los próximos 40 años, se sitúa en la horquilla del 0,5 % del PIB anual de Pontevedra al 3 % del PIB anual de Cantabria, según las provincias (Figura 55 izquierda). En términos relativos, nuevamente Cantabria y, a continuación, Coruña son las provincias más afectadas en cuanto a producción afectada por inundación permanente. Sin embargo los eventos extremos de inundación afectarán en mayor medida a Vizcaya. La Figura 55 derecha muestra la afección total producida por el evento extremo de 50 años de período de retorno en el año 2040, como se puede ver en Cantabria, Vizcaya y Guipúzcoa la contribución a la afección por inundación permanente es de más de un 2 % adicional. En términos generales, son las provincias vascas las más afectadas (Vizcaya y Guipúzcoa) seguidas por Cantabria, Asturias y Coruña.

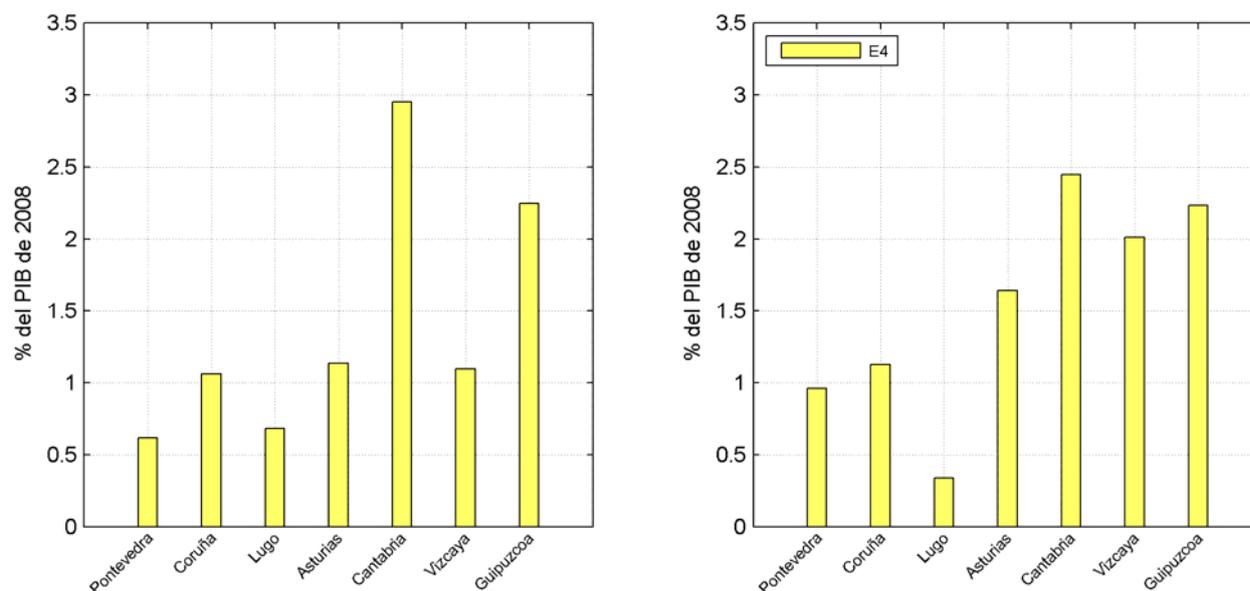


Figura 55. Valor medio anual del PIB afectado por el proceso de inundación gradual en el escenario E4 hasta el año 2040 (panel izquierdo) y valor del PIB afectado por eventos extremos de inundación en el año 2040 (panel derecho), en términos de porcentaje sobre el PIB de cada provincia en 2008. Se considera la evolución de la actividad económica en ausencia de medidas de adaptación. Los valores han sido actualizados al presente ($r=3\%$). Fuente: IH Cantabria.

Un resultado más interesante surge al analizar la distribución de usos de las áreas afectadas (fuente SIOSE), que se emplearán a continuación como criterio de desagregación de impactos. Como podemos comprobar en la Figura 56 la mayor exposición relativa se da en las zonas que soportan infraestructuras seguidas de las áreas industriales. Puede comprobarse asimismo la distinta exposición que se observa entre la vertiente atlántica y la cantábrica. Así, en las provincias de A Coruña y Pontevedra se obtiene que el 15 y el 22 % de la superficie total empleada en infraestructuras se encuentra actualmente en zonas susceptibles de verse afectadas por la inundación costera para un escenario de subida de nivel del mar global de 85 cm (próximo al peor previsto por el IPCC) en el año 2100. Hemos dedicado un gran esfuerzo inversor a configurar las infraestructuras y el capital productivo de nuestra sociedad, y ahora nos vemos obligados a realizar un proceso de redefinición de nuestra sociedad en los próximos años que afectará a una fracción grande del mismo.

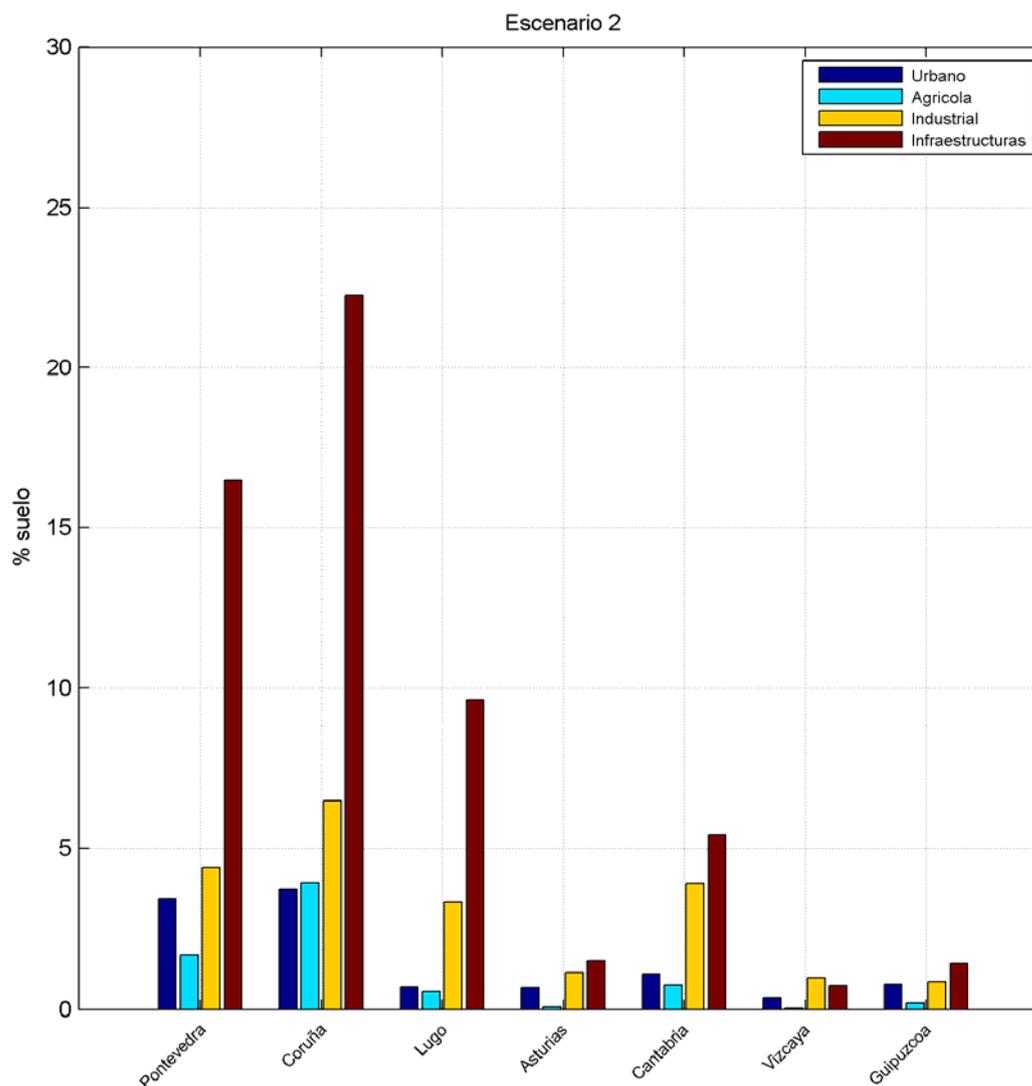


Figura 56. % de suelo urbano, agrícola, industrial o de infraestructuras afectado por inundación permanente en 2100 en ausencia de medidas de adaptación, respecto al suelo total del sector correspondiente por provincias. Fuente: IH Cantabria.

A continuación procedemos a identificar el Valor Añadido Bruto (VAB) de los sectores económicos básicos: agricultura, industria y servicios. Para ello distribuimos uniformemente la actividad en las áreas espaciales que la caracterizan: medio agrícola, uso industrial y superficie urbana (para los servicios), y calculamos la fracción de dicho VAB que se encuentra ubicada en áreas susceptibles de inundación para los distintos escenarios. Este modelo implica hipótesis simplificadoras, como la distribución uniforme de la actividad o la localización de los servicios mayoritariamente en el medio urbano. Asimismo el modelo presenta diferencias en la naturaleza del dato analizado respecto de las estimaciones en PIB presentadas anteriormente. En el caso anterior, se manejaba el PIB total, lo que incluye transferencias, gasto social, etc. cuya afección por cambio climático serían dudosas (de ahí las cautelas incluidas en el texto). En el caso del VAB

presentamos un grupo de componentes de dicho PIB total que por ser espacialmente localizables permiten radiografiar con más detalle el fenómeno, frente a un análisis de la sociedad globalmente considerada. Presentamos ahora un análisis de las actividades económicas afectadas, un análisis de nuestra fuente de riqueza.

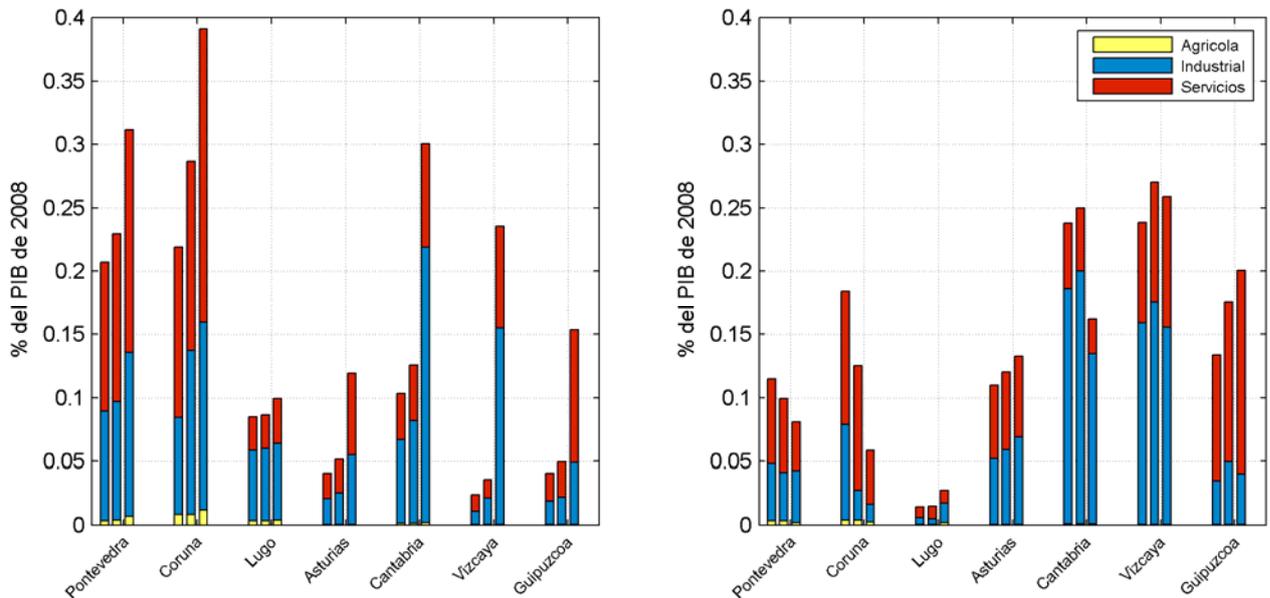


Figura 57. Valor en el año 2100 del VAB afectado por inundación permanente en los tres sectores (panel izquierdo) y por extremos de inundación (panel derecho) en términos de porcentaje sobre el PIB de cada provincia en 2008. Representación para los escenarios E1 a E3 al año horizonte 2100, en ausencia de medidas de adaptación. Valor actualizado al presente ($r=3\%$). Hipótesis de crecimiento VAB (0%). Fuente: IH Cantabria.

Podemos comprobar en la Figura 57 la mayor exposición del VAB industrial que en términos relativos afecta especialmente a Cantabria, Vizcaya y Coruña (siendo Vizcaya la más afectada en términos absolutos). La importancia de la vulnerabilidad que surge al introducir los eventos extremos de inundación es especialmente llamativa en Vizcaya², donde podemos comprobar que los impactos marginales derivados de la inundación por extremos tienen un impacto doble del que implica la inundación permanente. Finalmente, podemos comprobar la elevada vulnerabilidad del sector servicios ante los eventos extremos (y por ende de las áreas urbanas). Este último efecto, afecta especialmente a las provincias de Pontevedra y A Coruña, a causa de la naturaleza geomorfológica de sus rías y a la distribución de los asentamientos poblacionales. Este análisis, para el

² Ya se ha comentado anteriormente que la acumulación de VAB por inundación permanente y por eventos extremos implica combinar dos valores de distinta vulnerabilidad. Sin embargo asumimos que ambas componentes superan el umbral del daño que lleva a reconsiderar la localización de los activos.

escenario 2100, implica someter a la actividad económica observada, a una inundación como la esperada para el horizonte 2100, lo cual implica de nuevo ser conservador en la estimación de la actividad económica y el momento de la inundación, y pesimista en cuanto a la cuantía de la inundación aplicada.

La Figura 58 muestra el análisis hecho para el escenario del año 2040, en el que se estima una tendencia evolutiva para las circunstancias socioeconómicas. Además, en este caso, se tiene en cuenta la evolución temporal del aumento del nivel del mar, por lo que se somete al territorio a un proceso de inundación gradual que podemos estimar. En consecuencia este indicador es más ilustrativo del proceso temporal de inundación y capta mejor los efectos diferenciados entre zonas que a largo plazo presentan la misma vulnerabilidad, pero cuyo horizonte temporal sigue trazas distintas estando sometido a diferentes escenarios temporales de inundación. Aquellas zonas cuya inundación es inmediata adquieren aquí más visibilidad que aquellas cuya afección está diferida en el tiempo.

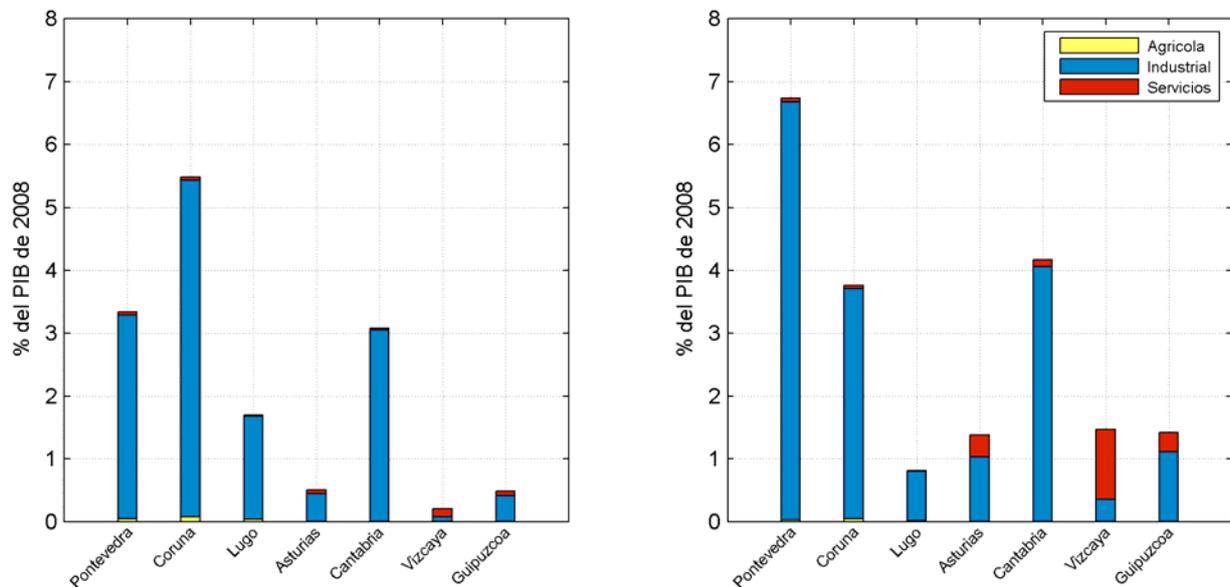


Figura 58. Valor medio anual del VAB afectado por el proceso de inundación gradual en el escenario E4 hasta el año 2040 (panel izquierdo) y VAB afectado por extremos de inundación en el año 2040 (panel derecho) en términos de porcentaje sobre el PIB de cada provincia en 2008. Valor actualizado al presente ($r=3\%$). Se considera evolución de la actividad económica en ausencia de medidas de adaptación. Fuente: IH Cantabria.

Podemos comprobar cómo se repiten dos fenómenos anteriormente descritos: mayor vulnerabilidad de las provincias de A Coruña y Pontevedra (vertiente atlántica), junto con Cantabria (vertiente cantábrica), y especial vulnerabilidad de las áreas urbanas (y de servicios) de Vizcaya frente a eventos extremos de inundación. Asimismo podemos comprobar que el impacto marginal de los eventos extremos es mayor que el derivado de la inundación permanente. Sin embargo, la relación entre ambas afecciones que en el

escenario anterior era de 2 a 1, es ahora prácticamente de 1 a 1, lo que refleja por un lado que el impacto de los eventos extremos crece exponencialmente con el año horizonte, y por otro lado que los daños por inundación gradual están mejor medidos al introducirse la pauta temporal esperada para la inundación permanente. Asimismo, podemos comprobar que el grado de exposición del sector servicios y áreas urbanas es mucho mayor comparativamente en el escenario a final de siglo (2100) que en el escenario a medio plazo (año 2040). Esta cuestión requiere una matización en el caso de Galicia donde la diseminación de las áreas urbanas y el gran número de núcleos sesga el peso aparente de las áreas urbanas costeras que si bien contienen a la mayoría de la población no contienen la mayoría de la superficie urbana pero, en todo caso, invita a concluir que la afección esperable en la primera mitad del siglo XXI podría ser cualitativamente distinta de la que tendrá lugar en la segunda mitad, afectando la primera a áreas industriales más expuestas y la segunda a áreas urbanas.

Por último, vamos a analizar el valor del stock de capital que se ve afectado por los eventos de cambio climático, es decir, la riqueza afectada. Para ello contamos con la valoración realizada por la Fundación BBVA junto con el Instituto Valenciano de Investigaciones Económicas (IVIE) donde se evalúan las componentes del stock de capital provincial. Este análisis completa algunas carencias de los indicadores anteriormente obtenidos, especialmente en cuanto al hecho de que la elaboración de indicadores centrados en la valoración de la actividad económica ha captado parcialmente las consecuencias de la dotación de capital privado disponible, pero ha dejado fuera la contribución a la estructura económica de la sociedad del stock de capital público que sirve al bienestar directo de la población, bien totalmente (como los hospitales y las escuelas), o parcialmente como las comunicaciones que sirven tanto a los agentes económicos en su papel de consumidores como de agentes productivos. El procedimiento seguido ha sido determinar la cuota de áreas inundadas por uso respecto del total provincial por usos y a partir de este factor estimar la cuota de componentes del capital afectados en cada escenario.

En ambos casos se ha calculado el valor actualizado al presente del stock de capital afectado, con la diferencia de que, al igual que en el resto de las estimaciones, la inundación al año 2100 se ha tratado como un único evento para una sociedad igual a la presente y la inundación al año 2040 se ha evaluado gradualmente.

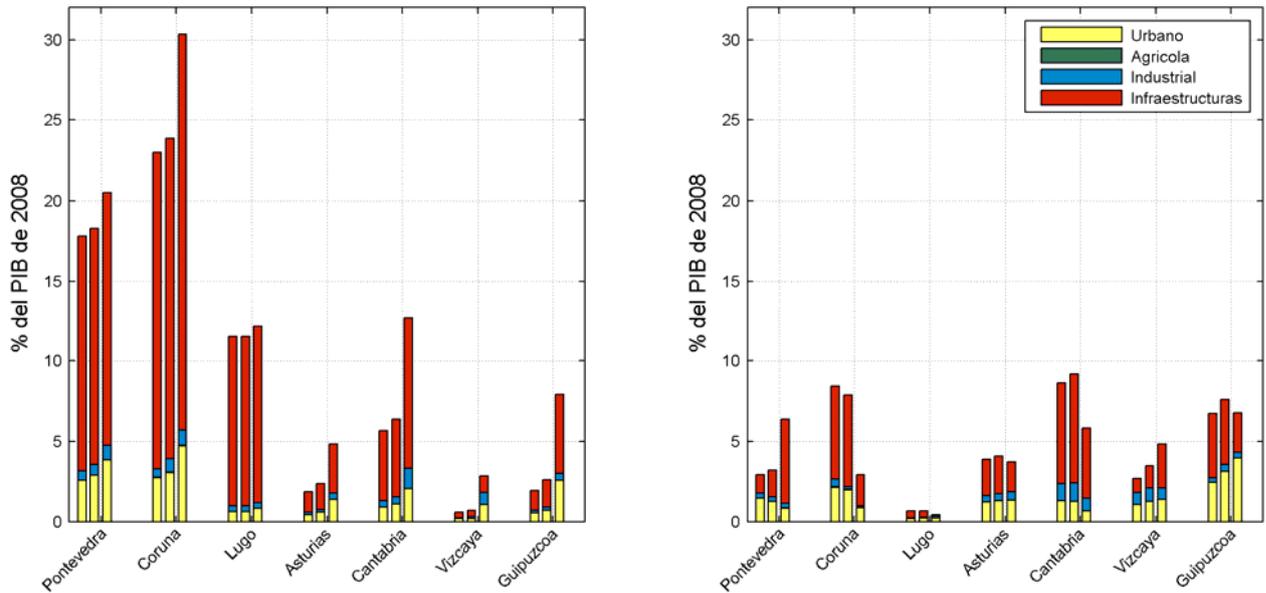


Figura 59. Valor del stock de capital afectado por inundación permanente (panel izquierdo) y eventos extremos de inundación (panel derecho) en términos de porcentaje sobre el PIB de 2008. Representación para los escenarios E1 a E3 al año horizonte 2100, en ausencia de medidas de adaptación. Valor actualizado al presente ($r=3\%$). Fuente: IH Cantabria.

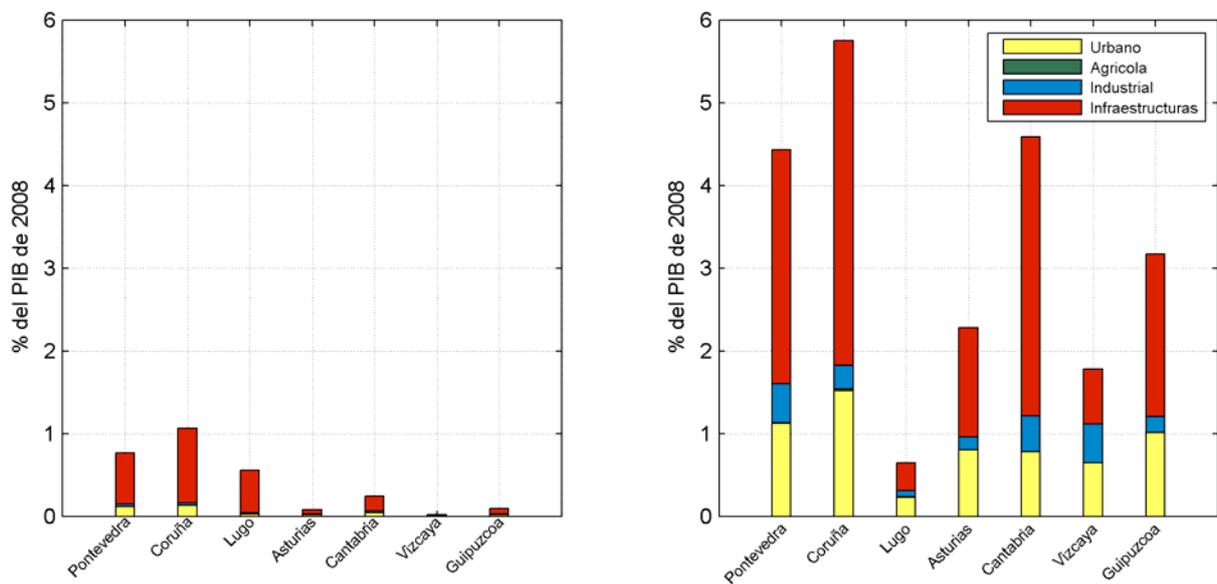


Figura 60. Valor medio anual del stock de capital afectado por inundación permanente (panel izquierdo) y valor del stock de capital afectado por eventos extremos de inundación (panel derecho) en términos de porcentaje sobre el PIB de 2008 en el año 2040. Valor actualizado al presente ($r=3\%$). Se considera evolución de la actividad económica en ausencia de medidas de adaptación. Fuente: IH Cantabria.

Los resultados que se observan en la Figura 59 y Figura 60 muestran regularidades que obligan a la reflexión. En primer lugar se observa una elevada participación de las infraestructuras en el stock de capital inundado, por encima del capital urbano y del industrial. Esta situación puede explicarse como una valoración anómala del capital en infraestructuras por su elevada visibilidad contable para el sector público, o como una consecuencia de la metodología de valoración de la fuente. Asimismo, puede estar apuntando a la elevada exposición de las infraestructuras en ciertas zonas al impacto del clima en la costa.

Finalmente la peculiaridad más llamativa deriva de las diferencias espaciales entre las dos provincias con costa atlántica A Coruña y Pontevedra, y Vizcaya frente al resto de las provincias. La explicación a este hecho puede ser múltiple. En primer lugar, la distribución de los núcleos urbanos en Galicia puede sesgar los datos del capital urbano, tal y como indicamos anteriormente; en segundo lugar, la calidad de los datos del SIOSE puede ser distinta en Galicia por el efecto miopía que representan unidades espaciales tan fragmentadas que quedan por debajo del umbral del análisis; y por último, puede tratarse de un problema de visibilidad de datos económicos que haga más visibles las inversiones en estas zonas. Pero en todo caso parece ser el resultado de una auténtica diferencia en la densidad espacial de capital, y de una mayor exposición del capital en la zona de las rías gallegas por lo que parece recomendable un estudio de detalle al respecto.

En cuanto a dónde hay que actuar, hemos podido comprobar cómo la vulnerabilidad al cambio climático se distribuye irregularmente en el espacio, siendo mayor en términos absolutos allí donde hay más actividad económica y población en la franja costera, pero siendo relativamente mayor en las provincias que son más intensivas en el uso de la costa, es decir donde población y actividad económica están más polarizadas hacia la costa. En ese sentido, comprobamos que el grado de dependencia entre actividad económica y población por un lado y uso de espacios costeros vulnerables por otro es mayor en Cantabria y Guipúzcoa que en Vizcaya y Asturias.

Por último cabría establecer unas prioridades sociales. A través del análisis de la RFBD de las personas afectadas podemos aproximar la distribución de los impactos a través de la escala de rentas de la sociedad (Figura 61). No obstante este análisis es poco representativo a escala provincial, dado que la variabilidad de la renta intraprovincial es mucho mayor que la interprovincial. En estudios más desagregados espacialmente en que el análisis se realice a escala municipal con las rentas disponibles distribuidas espacialmente, podrán estimarse las consecuencias distributivas de los impactos de cambio climático con mucha más precisión.

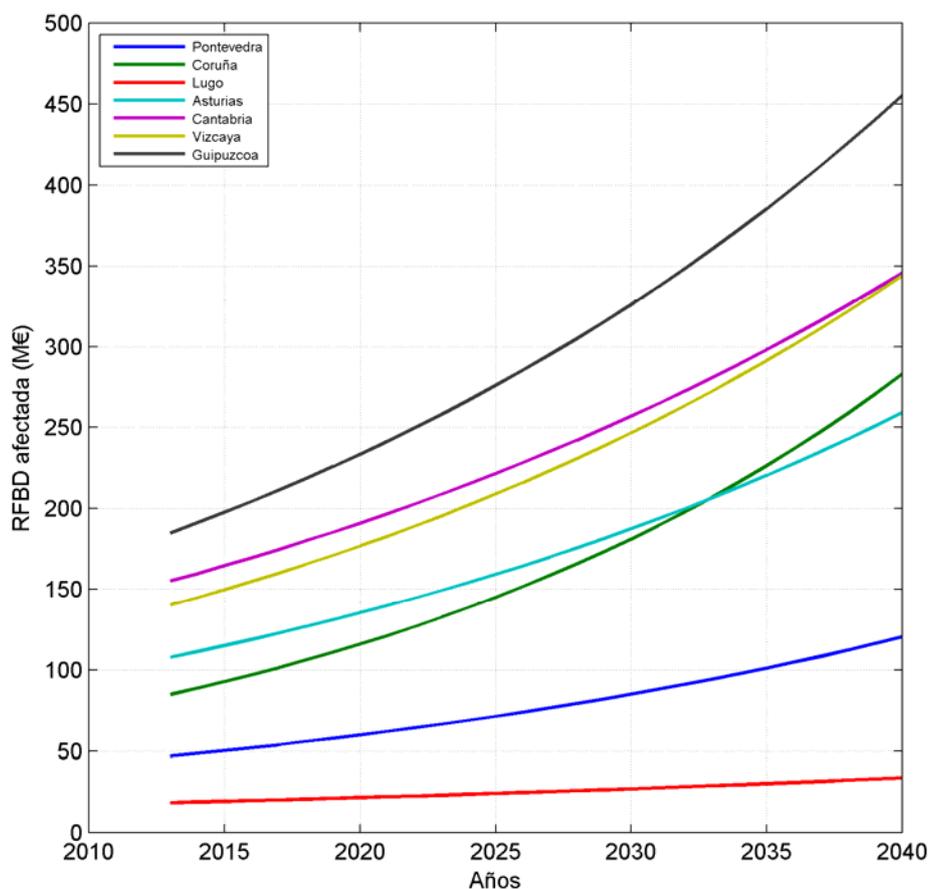


Figura 61. Evolución temporal de la RFBD afectada por provincias. Estimación de crecimiento de la población y la renta. Unidades Monetarias Constantes. Se considera la evolución de la actividad económica. Inundación prevista para el periodo hasta 2040 en ausencia de medidas de adaptación. Fuente: IH Cantabria.

REFERENCIAS

Aguiló E., J. Alegre y M. Sard, 2005. The persistence of the sun and sand tourism model. *Tourism Manage*, 26, 219-231.

Ahrendt K., 2001. Expected effects of climate change on Sylt Island; results from a multidisciplinary German project. *Climate Res.*, 18, 141-146.

Alvarado-Aguilar D., J.A. Jiménez y R.J. Nicholls, 2012. Flood Hazard and damage assessment in the Ebro Delta (NW Mediterranean) to relative sea level rise. *Natural Hazards*, 62, 1301-1321.

Arenas P., 2008. Gestión del litoral y política pública en España: un diagnóstico. Grupo GIAL-UCA. Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales. Universidad de Cádiz.

Arnaud-Haond S., C. M. Duarte, E. Díaz-Almela, N. Marbà, T. Sintès y E. A. Serrão 2012. Implications of extreme life span in clonal organisms: millenary clones in meadows of the Threatened seagrass *Posidonia oceanica*. *PLoS ONE*, 7, 2, e30454, doi: 0030454.

Barnston, A. G. and R. E. Livezey, 1987. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*, 115, 1083-1126.

Bender M.A., T.R. Knutson, R.E. Tuleya, J.J. Sirutis, G.A. Vecchi, S.T. Garner, I.M. Held, 2010. Modeled impact of anthropogenic warming of the frequency of intense Atlantic hurricanes. *Science* 327, 454-458.

Birkemeier, W.A. 1985. Field Data on Seaward Limit of Profile Change. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, American Society of Civil Engineers, 111, 3, 598-602.

Borges A. V. and Abril G., 2011: Carbon dioxide and methane dynamics in estuaries. In: Wolanski E. M., D (Ed.), *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, pp. 119-161. Waltham: Academic Press.

Brander K., G. Blom, M.F. Borges, K. Erzini, G. Henderson, B.R. MaxKenzie, H. Mendes, A.M.P. Santos y P. Toresen, 2003. Changes in fish distribution in the eastern North Atlantic: are we seeing a coherent response to changing temperature? *ICES Marine Science Symposia*, 219, 260-273.

Bruun P., 1962. Sea-level rise as a cause of soil erosion. American Society of Civil Engineering Proceedings, *Journal of Waterways and Harbours Division*, 88, 117-130.

Cai W.-J., Hu X., Huang W.-J., Murrell M. C., Lehrter J. C., Lohrenz S. E., Chou W.-C., Zhai W., Hollibaugh J. T., Wang Y., Zhao P., Guo X., Gundersen K., Dai M. and Gong G.-

C., 2011. Acidification of subsurface coastal waters enhanced by eutrophication. *Nature Geoscience* 4:766–770.

Caires, S., V. Swail and X.L. Wang (2006). Projection and Analysis of Extreme Wave Climate. *Journal of Climate*, 19(21), 5581-5605.

Cambio Climático en el Delta del Ebro 2009. *Estudios de base para una estrategia de prevención y adaptación al cambio climático en Cataluña*. Generalitat de Cataluña. Gobierno de Cataluña. Departamento de Medio Ambiente y Vivienda.

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.

Church, J. A. y N.J. White, 2011. Sea-level rise from the late 19th to the early 21st Century. *Surveys in Geophysics*, 32, 585-602, doi:10.1007/s10712-011-9119-1.

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, doi:10.5670/oceanog.2011.33

Ciscar J.C., A. Iglesias, L. Feyen, et al. 2011. Physical and economic consequences of climate change in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 108 (7), 2678–2683. doi: 10.1073/pnas.1011612108.

Codignotto J.O. 2004. *Diagnóstico del estado actual de las áreas costeras de Argentina*. Informe para el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (Argentina) PNUD/ARG 3, 43 pp.

Cook, A., A.J. Fox, D.G. Vaughan y J. G. Ferrigno. 2005. Retreating glacier-fronts on the Antarctic Peninsula over the last 50 years, *Science*, 22, 541-544.

Cowell P.J., M.J.F. Stive, A.W. Niedoroda, H.J. De Vriend, D.J.P. Swift, G.M. Kaminsky y M. Capobianco 2003. The coastal tract. Part 1: A conceptual approach to aggregated modelling of lower-order coastal change. *J. Coastal Res.*, 19, 812-827.

Crain C.M., B.S. Halpern, M. W. Beck y C.V. Kappel, 2009. Understanding and managing human threats to the coastal marine environment. *Year in Ecology and Conservation Biology*, 1162, 39-62.

Defeo y McLachlan 2005. Processes and regulatory mechanisms in sandy beach macrofauna: a multi-scale analysis.

Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar, 2008. *Actividades Humanas en los Mares de España*.

Doney S. C., Mahowald N., Lima I., Feely R. A., Mackenzie F. T., Lamarque J.-F. and Rasch P. J., 2007: Impact of anthropogenic atmospheric nitrogen and sulfur deposition

on ocean acidification and the inorganic carbon system. *Proceedings of the National Academy of Science U.S.A.* 104:14580-14585.

Easterling W.E., 2003. Observed impacts of climate change in agriculture and forestry. *IPCC Workshop on the Detection and Attribution of the Effects of Climate Change*, Junio 17-19, New York City, USA.

Ericson J.P., C.J. Vorosmarty, S.L.Dingman, L.G. Ward y M. Meybeck, 2006. Effective sea-level rise and deltas: causes of change and human dimension implications. *Global Planetary Change*, 50, 63-82.

Eurosion 2004. Living with Coastal Erosion in Europe: Sediment and Space for Sustainability. Part 1 Major findings and Policy Recommendations of the EUROSION project. Guidelines for implementing local information systems dedicated to coastal erosion management.

Factoric S. y L. Chelleri, 2012. Vulnerability to the effects of climate change and adaptation: The case of the Spanish Ebro Delta. *Ocean and Coastal Management* 60, 1-10.

Feely R. A., Alin S. R., Newton J., Sabine C. L., Warner M., Devol A., Krembs C. and Maloy C., 2010. The combined effects of ocean acidification, mixing, and respiration on pH and carbonate saturation in an urbanized estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 88,442-449.

Fletcher C.A. y T. Spencer Eds. 2005. *Flooding and Environmental Challenges for Venice and its Lagoon: State of Knowledge*. Cambridge University Press, Cambridge, 691 pp.

Fundación BBVA, 2010. La población en España: 1900-2009.

Gómez-Gesteira M., de Castro M., Alvarez I. and Gómez-Gesteira J. L., 2008: Coastal sea surface temperature warming trend along the continental part of the Atlantic Arc (1985-2005). *Journal of Geophysical Research* 113, 04010.

Gomis D., S. Ruiz, M.G. Sotillo, E. Álvarez-Fanjul y J. Terradas, 2008. Low frequency Mediterranean sea level variability: The contribution of atmospheric pressure and wind. *Global and Planetary Change*, 63, 215-229.

Gonzalez M. y R. Medina, 2001. On the application of static equilibrium bay formulations to natural and man-made beaches. *Coastal Engineering*, 43, 3-4, 209-225.

Guillén J., y A. Palanques, 1992. Sediment dynamics and hydrodynamics in the lower course of a river highly regulated by dams: the Ebro River. *Sedimentology*, 39, 567- 579.

Hallegatte S., N. Ranger, O. Mestre, P. Dumas, J. Corfee-Morlot, C. Herweijer y R.M. Wood 2011. Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: a case study on Copenhagen. *Climatic Change*, 104, 113-137.

Harley C.D.G., A.R. Hughes, K.M. Hultgren, B.G. Miner, C.J.B. Sorte, C.S. Thornber, L.F. Rodriguez, L. Tomanek y S.L. Williams 2006. The impacts of climate change in coastal marine Systems. *Ecol. Lett.*, 9, 228-241.

Hemer M. A., Y. Fan, N. Mori, A. Semedo y X.L. Wang, 2013. Projected changes in wave climate from a multi-model ensemble. *Nature Climate Change*, 3(5), 471-476.

HM Treasury 2003. *The Green Book*. Appraisal and Evaluation in Central Government.

Hosking A. y R. McInnes, 2002. Preparing for the impacts of climate change on the Central Southeast of England: A framework for future risk management. *J. Coastal Res.*, S36, 381-389.

Ibáñez, C., Prat, N. y A. Canicio, 1997. Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the lower Ebro river and its estuary. *Regulated Rivers: Research & Management*, 12, 51-62.

International Strategy for Disaster Reduction 2009. *UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction*. United Nations.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report (AR4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York. <http://www.ipcc.ch>.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Working Group I Contribution to the IPCC 5th Assessment Report - Changes to the Underlying Scientific/Technical Assessment" (IPCC-XXVI/Doc.4)

Izaguirre C., F.J. Méndez, M. Menéndez, A. Luceño y I.J. Losada, 2010. Extreme wave climate variability in southern Europe using satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 115, C04009.

Izaguirre C., F.J. Méndez, M. Menéndez y I.J. Losada (2011). Global extreme wave height variability based on satellite data. *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, L10607.

Jordà G., D. Gomis, E. Álvarez-Fanjul y S.Somot, 2012a. Atmospheric contribution to Mediterranean and nearby Atlantic sea level variability under different climate change scenarios. *Global and Planetary Change*, 80-81, 198-214.

Jordà G., N. Marbà y C.M. Duarte, 2012b. Mediterranean seagrass vulnerable to regional climate warming. *Nature Climate Change*, 2, 821-824.

Kebede, A.S. y R.J. Nicholls, 2012. Exposure and vulnerability to climate extremes: population and assets exposure to coastal flooding in Dar es Salaam, Tanzania. *Regional Environmental Change*, 12, 81-94.

Leatherman S.P. 2001. Social and economic costs of sea-level rise. *Sea level rise, History and Consequences*, B.C. Douglas, M.S. Kearney and S.P. Leatherman Eds., Academic Press, 181-223.

Leont'yev I.O., 2003. Modelling erosion of sedimentary coasts in the Western Russian Arctic. *Coastal Engineering*, 47, 36-47.

Lima F. P. y Wethey D. S., 2012. Three decades of high-resolution coastal sea surface temperatures reveal more than warming. *Nature Communications* 3, 1-13.

Losada M.A., 2010. Las Riberas del Mar Océano.

Lotze H.K., H.S. Lenihan, B.J. Bourque, R.H. Bradbury, R.G. Cooke, M.C. Kay, S.M. Kidwell, M.X. Kirby, C.H. Peterson y J.B.C. Jackson, 2006. Depletion, degradation and recovery potential of estuaries and coastal seas. *Science*, 312, 1806-1809.

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.

Marcos M., G. Jordà, D. Gomis y B. Pérez, 2011. Changes in storm surges in southern Europe from a regional model under climate change scenarios. *Global and Planetary Change*, 77, 116-128.

Martín-Vide, J., and J. A. López-Bustins, 2006. The western Mediterranean Oscillation and Iberian peninsula rainfall. *International Journal of Climatology*, 26 (11), 1455-1475.

McGranahan G., D. Balk y B. Anderson, 2007. The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and Urbanization*, 19-17, doi: 10.1177/0956247807076960.

McLachlan A. y A.C. Brown, 2006. *The ecology of Sandy shores*. 2nd Edition, Academic Press: Amsterdam, The Netherlands.

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.

Menéndez M. y P.L. Woodworth, 2010. Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tide-gauge dataset. *Journal of Geophysical Research*, 115, C10011.

Ministerio de Medio Ambiente 2007. *Estrategia para la sostenibilidad de la Costa*. Documento de inicio. Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General de Costas, Madrid. 21 pp.

Mori, N., T. Yasuda, H. Mase, T. Tom, and Y. Oku, 2010: Projection of extreme wave climate change under global warming. *Hydrological Research Letters*, 4, 15-19, doi:10.3178/hrl.4.15.

Nicholls, R.J., 2004. Coastal flooding and wetland loss in the 21st Century: changes under the SRES climate and socio-economic scenarios. *Glob. Environ. Change*, 14, 69-86.

Nicholls, R.J. y R.S.J. Tol, 2006. Impacts and responses to sea-level rise: a global análisis of the SRES scenarios over the twenty-first Century. *Philos. T. Roy. Soc. A*, 364, 1073-1095.

Nicholls, R.J. y A. Cazenave, 2010. Sea-level rise and its impacts on coastal zones. *Science*, 328(5985), 1514-1520.

Nicholls, R.J., N. Marinova, J.A. Lowe, S. Brown, P. Vellinga, D. de Gusmao, J. Hinkel y R.S.J. Tol, 2011. Sea-level rise and its possible impacts given a 'beyond 4°C world' in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369 (1934), 161-181.

Observatorio de la Sostenibilidad en España, 2011. *Sostenibilidad en España 2011*.

Peltier, W.R. 2004. Global glacial isostasy and the surface of the Ice-Age Earth: The ICE-5G(VM2) model and GRACE. *Annual Review of Earth and Planetary Science* 32, 111-149.

Pethick J., 2001. Coastal Management and sea-level rise. *Catena* 42, 307-322.

Piao S. L., Friedlingstein P., Ciais P., de Noblet-Ducoudre N., Labat D. and Zaehle S., 2007: Changes in climate and land use have a larger direct impact than rising CO₂ on global river runoff trends. *Proceedings of the National Academy of Science U.S.A.* 104, 15242-15247.

Pierre G y P. Lahousse, 2006. The role of groundwater in cliff instability: an example at Cape Blanc-Nez (Pas-de-Calais, France). *Earth Surf. Proc. Land.*, 31, 31-45.

Puertos del Estado 1999. ROM 3.1-99 Proyecto de la Configuración Marítima de los Puertos: Canales de Acceso y Áreas de Flotación.

Pugh D. T., 1987. Tides, Surges and Mean Sea Level: a Handbook for Engineers and Scientists; p. 472.

Rahmstorf S., 2007. A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science* 315, 368-370.

Salisbury J., Green M., Hunt C. and Campbell J., 2008. Coastal acidification by rivers: a new threat to shellfish? *Eos, Transactions, American Geophysical Union* 89, 513.

Satterthwaite D., S. Huq, M. Pelling y H. Reid, 2007. Adapting to Climate Change in Urban Areas - the possibilities and constraints in low- and middle-income nations. Human

Settlements Discussion Paper Series Theme: Climate Change and Cities - 1, International Institute for Environment and Development.

Scavia D., J.C. Field, D.F. Boesch, R. Buddemeier, D.R. Cayan, V. Burkett, M. Fogarty, M. Harwell y Co-autores, 2002. Climate change impacts on U.S. coastal and marine ecosystems. *Estuaries* 25, 149-164.

Schneiderbauer S. y 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.

Scott D., G. Wall y G. McBoyle, 2005. Climate change and tourism and recreation in North America: exploring regional risk and opportunities. *Tourism, Recreation and Climate Change*, C.M. Hall y J. Higham, Eds., Channel View, Clevedon, 115-129.

Short F.T., y H.A. Neckles, 1999. The effects of global change on seagrasses. *Aquat. Bot.*, 63, 169-196.

Slangen, A.B.A., C.A. Katsman, R.S.W. van de Wal, L.L.A. Vermeersen and R.E.M. Riva, 2012. Towards regional projections of twenty-first century sea-level change based on IPCC SRES scenarios, *Climate Dynamics*, 38 (5-6), 1191-1209.

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. *Projecting twenty-first century regional sea-level changes*. Climatic Change, doi:10.1007/s10584-014-1080-9.

Steffen W., 2009. *Climate Change 2009: Faster change and more serious risks*, Department of Climate Change, Canberra.

Syvitski, J.P.M., 2008. Deltas at risk. *Sustainability Science*, 3, 23-32.

Taylor K., R.J. Stouffer, G.A. Meehl, 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of American Meteorological Society*, 93(4), 485-498.

UNISDR 2009. Terminology on Disaster Risk Reduction. International Strategy for Disaster Reduction.

U. S. Army Corps of Engrs. Coastal Engrg., Res., Center, 1984. *Shore Protection Manual* (3rd Ed.), U. S. Gov. Print. Office.

Vargas M., et al., 2010. *Cambio climático en el Mediterráneo español*. Segunda edición actualizada. IEO, Ministerio de Ciencia e Innovación, Madrid, 176 pp

Vermeer M. y S. Rahmstorf, 2009. Global Sea Level Linked to Global Temperature. *Proceedings of the National Academy of Science U.S.A.* 106, 21527-21532.

Walker, B., C. S. Holling, S. R. Carpenter, and A. Kinzig, 2004. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society* 9(2), 5.

Wang, X. L. and V. Swail (2006). Climate change signal and uncertainty in projections of ocean wave height. *Climate Dynamics*, 26, 109-126.

Wisser D., Fekete B. M., Vorosmarty C. J. and Schumann A. H., 2010: Reconstructing 20th century global hydrography: a contribution to the Global Terrestrial Network-Hydrology (GTN-H). *Hydrology and Earth System Sciences* 14, 1-24.

WTO, 2003. Climate change and tourism. *Proceedings of the 1st International Conference on Climate Change and Tourism*, 9-11th April, Djerba, Tunisia, World Tourism Organization. 55 pp.

Zhang K.Q., B.C. Douglas y S.P. Leatherman, 2004. Global warming and coastal erosion. *Climatic Change* 64, 41-58.



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE