

---

# *Aumento del nivel del mar en la costa vasca: una aproximación probabilística*

## *Sea-level rise in the Basque coast, a probabilistic approach*

El aumento del nivel del mar representa una de las principales amenazas del cambio climático para la costa vasca. En este artículo estimamos el valor medio esperado de aumento del nivel del mar en once localidades bajo tres escenarios de emisión, junto con dos medidas de riesgo que describen aquellos eventos de baja probabilidad pero de gran magnitud. Nuestros resultados para el año 2050 sugieren aumentos medios de entre 21-29 cm y valores extremos significativamente mayores, de 35-45 cm para el percentil 95 y de 40-52 cm para la media del 5% de los peores casos. Esta información puede ser muy relevante para el desarrollo de políticas de adaptación al cambio climático ya que permite una gestión del riesgo más adecuada, en línea con las aproximaciones empleadas desde la economía financiera.

*Itsas mailaren gorakada aldaketa klimatikoaren mehatxu garrantzitsuenetarikoa da euskal kostaldearentzat. Artikulu honetan itsas-mailaren batz besteko igoeraren esperotako balioa zenbaitetsi dugu hamaika herritan, hiru isurpen-egoeratan. Probabilitate txikiko baina magnitude handiko gertaerak deskribatzen dituzten bi arrisku neurketa ere zenbatesten dira. 2050. urterako gure emaitzek 21-29cm arteko batz besteko igoerak iradokitzen dituzte, eta muturreko balio askoz handiagoak, 35-45cm 95 pertzentilerako eta 40-52cm kasu okerrenen %5aren batz beste-koarentzako. Informazio hori oso esanguratsua izan daiteke klima aldaketaren egokitzapenerako politiken garapenean. Izan ere, arriskuaren kudeaketa egokiago bat ahalbidetzen du eta lerrokatuak baitago finantza ekonomikoan erabilitako hurbilpenekin.*

Due to climate change, sea-level rise poses a major threat to the Basque coast. In this study we assess the average sea-level rise under three emission scenarios in eleven municipalities of the Basque coast. We also estimate two risk measures that describe low-probability, high-damage events. Our results by 2050 show average sea-level increases in 21-29 cm and significantly larger extreme values, ranging between 35 and 45 cm at the 95<sup>th</sup> percentile and 40-52 cm at the average of 5% worst cases. This information could be very relevant to inform climate change adaptation policies and measures, as it allows managing risk more effectively, in line with the approaches used in financial economics.

**Elisa Sainz de Murieta<sup>1</sup>**

*Basque Centre for Climate Change (BC3)*

*Grantham Research Institute (LSE)*

**Luis María Abadie<sup>2</sup>**

*Basque Centre for Climate Change (BC3)*

**Ibon Galarraga<sup>3</sup>**

*Basque Centre for Climate Change (BC3)*

## Índice

---

1. Introducción
2. Enfoques basados en riesgo en la adaptación al cambio climático
3. Escenarios de aumento del nivel del mar en la costa vasca
4. Discusión y conclusiones

### Referencias bibliográficas

**Palabras clave:** Riesgo climático, aumento del nivel del mar, costa vasca, modelización estocástica.

**Keywords:** Climate risk, sea-level rise, Basque coast, stochastic modelling.

**Nº de clasificación JEL:** Q54, O44, Q51

Fecha de recepción: 6/04/2018

Fecha de aceptación: 11/07/2018

---

## 1. INTRODUCCIÓN

El aumento del nivel del mar representa una de las principales amenazas del cambio climático (IPCC, 2013). Desde 1880, el nivel del mar ha aumentado globalmente más de 20 cm (Hardy & Nuse, 2016), a una velocidad de alrededor de 2 mm al año durante el siglo XX (Church & White, 2006). Las mediciones vía satélite

---

<sup>1</sup> Elisa Sainz de Murieta agradece la financiación recibida por parte del Departamento de Educación del Gobierno Vasco a través del Programa Posdoctoral, de Perfeccionamiento de Personal Investigador Doctor (Ref. POS\_2017\_2\_0030).

<sup>2</sup> Luis M. Abadie agradece la financiación recibida del Gobierno Vasco a través del proyecto GIC12/177-IT-399-13 y también la otorgada por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (ECO2015-68023).

<sup>3</sup> Ibon Galarraga desea reconocer el apoyo del proyecto RESIN—Climate Resilient Cities and Infrastructures Project (European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement no. 653522).

\* Los autores agradecen las valiosas sugerencias y comentarios de los evaluadores anónimos de la revista en el proceso de revisión del artículo.

muestran que, además, se está produciendo una aceleración debido a la cual la velocidad de ascenso es ya de en torno a 3 mm al año desde 1993 (Hay *et al.*, 2015; Watson *et al.*, 2015), e incluso mayor, si se consideran únicamente mediciones más recientes, a partir 2010 (Yi *et al.*, 2015). Tanto el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) a nivel global (IPCC, 2013), como los estudios con resultados regionalizados para cualquier escenario representativo de concentración (RCP de sus siglas en inglés), prevén una subida acelerada del nivel del mar a lo largo del presente siglo (Grinsted *et al.*, 2015; Jackson & Jevrejeva, 2016; Kopp *et al.*, 2014; Slangen *et al.*, 2014).

Globalmente, las zonas costeras de baja elevación<sup>4</sup> representan un 2% de la superficie emergida, pero concentran un 10% de la población mundial y gran parte de los activos económicos y las infraestructuras. Un 65% de las grandes ciudades costeras, con poblaciones por encima de los 5 millones de habitantes, se ubica al menos parcialmente en zonas costeras de baja elevación y los desastres naturales afectan en mayor medida a estas urbes. Durante los últimos 40 años, la población en riesgo de eventos costeros extremos con un periodo de retorno de 100 años ha aumentado un 95%, y se espera que el cambio climático agrave este riesgo en el futuro (McGrannahan *et al.*, 2007; Wong *et al.*, 2014).

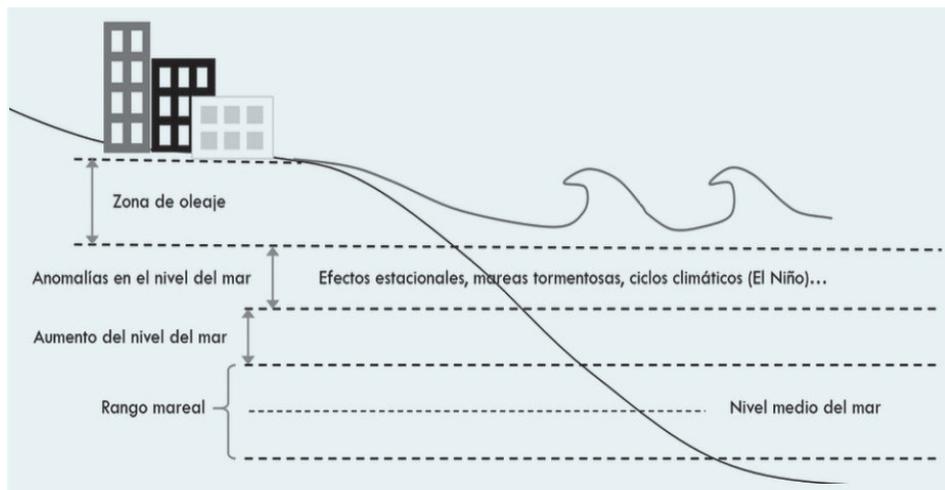
El País Vasco, en su sentido cultural más amplio, es una región ubicada en el Golfo de Vizcaya, formada por siete territorios históricos, cuatro de los cuales están en territorio español (Araba, Bizkaia, Gipuzkoa y Navarra) y los otros tres en territorio francés (Lapurdi, Baja Navarra y Zuberoa). La costa vasca tiene una longitud aproximada de 150 km, desde la punta Cobarón en Bizkaia hasta la desembocadura del río Adur, que limita el departamento de Pirineos Atlánticos con el de Landas. Con una geografía abrupta en su vertiente cantábrica, la mayoría de la población vasca se concentra en torno a los estuarios en zonas de baja altitud. En la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV), que engloba las provincias de Araba, Bizkaia, Gipuzkoa, las zonas costeras albergan al 60% de la población, así como un tercio de las actividades industriales, a pesar de que representa tan solo el 12% de la superficie de esta comunidad (Cearreta *et al.*, 2004). Asimismo, la costa labortana, al norte del Bidasoa, concentra dos tercios de la población del País Vasco Francés y el 42% de la misma vive en el conglomerado urbano «Bayona-Anglet-Biarritz» (Gómez Uranga, 2003).

El aumento del nivel del mar, junto con los eventos extremos costeros, cuya naturaleza (intensidad, frecuencia y duración) se espera que se modifique como consecuencia del cambio climático (IPCC, 2012), representa uno de los principales riesgos para esta región (Gobierno Vasco, 2015). La combinación de ambos fenómenos en momentos determinados, como en las mareas vivas, puede ocasionar importantes daños en zonas expuestas dependiendo de sus características, pudiendo el nivel

<sup>4</sup> En este contexto, se entiende por franja costera de baja elevación aquella zona situada a una altitud igual o menor de 10 m por encima del nivel del mar (McGrannahan *et al.*, 2007)

del mar alcanzar, en algunos casos, alturas elevadas debido al fenómeno de subida en rampa (*run-up*). En general podemos decir que los impactos vendrán determinados por el efecto conjunto de algunos de los siguientes elementos: subida local del nivel del mar, tormentas, ciclos climáticos, efectos estacionales, mareas y olas (Vitousek *et al.*, 2017) (gráfico nº 1).

Gráfico nº 1, REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS DIFERENTES ELEMENTOS DE SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR



Fuente: Elaboración propia.

Las primeras proyecciones de aumento del nivel del mar para la costa vasca se publicaron en 2010 y consideraban los escenarios de emisión definidos por el IPCC como A1B y A2, obteniendo un rango de entre 33-49 cm y 29-45 cm respectivamente para finales de este siglo (Chust *et al.*, 2010). Estos resultados están en línea con las estimaciones del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (2007), que proyectaba un aumento del nivel del mar probable<sup>5</sup> a escala global de entre 18 y 59 cm en 2095. Posteriormente, un informe sobre los impactos del cambio climático en la costa española que proporcionaba estimaciones regionalizadas, incluía valores de aumento medio del nivel del mar para la zona más oriental del Golfo de Vizcaya de entre 40 cm y 60 cm, correspondientes al escenario de emisión intermedio (RCP4.5) y más desfavorable (RCP8.5) respectivamente, en el periodo 2081-2100 (Losada *et al.*, 2014)<sup>6</sup>.

<sup>5</sup> Probable es el término utilizado por el IPCC para aquellos procesos cuya probabilidad se estima que es mayor del 66% IPCC informe síntesis.

<sup>6</sup> Las cifras son aproximadas porque el estudio toma los datos de aumento del nivel del mar regionalizados para todo el mundo por Slangen *et al.* (2014) y los ajusta para la costa española, cartografiando el resultado por tramos de costa (véase Figura 11, página 37 del informe).

Aunque el uso de valores medios o rangos probables en los análisis y evaluaciones de los impactos del cambio climático resulta muy frecuente, son ya diversos autores los que han insistido en la necesidad de considerar también los valores extremos. Y especialmente, aquellos valores localizados en la cola superior de la distribución de probabilidades que representan los impactos más negativos (Hinkel *et al.*, 2015; Weitzman, 2013). Este tipo de aproximaciones al riesgo que analizan las situaciones de baja probabilidad pero gran impacto no son nuevas en disciplinas como la economía financiera y permiten una gestión más adecuada de los riesgos y, sobre todo, aproximaciones más adversas al riesgo. En el caso de impactos potencialmente catastróficos y de contextos de incertidumbre muy alta, este atributo adquiere una relevancia especial (Hinkel *et al.*, 2015; Weitzman, 2013).

Desde hace pocos años, este tipo de metodologías se han mostrado muy útiles para el tipo de análisis que se desarrolla en contextos de cambio climático. Por ejemplo, las medidas de riesgo, aunque su modelización resulte compleja, pueden ser de gran utilidad para apoyar la toma de decisiones en materia de adaptación al cambio climático. Como adelantábamos, las medidas de riesgo pueden ser utilizadas para valorar el riesgo de situaciones de baja probabilidad pero cuyos impactos negativos son muy importantes (Abadie *et al.*, 2017a), para realizar estimaciones de la idoneidad de una inversión utilizando la técnica de opciones reales (Abadie *et al.*, 2017b) o para realizar tests de estrés de planes de ordenación urbana, de adaptación, de grandes inversiones o de infraestructuras (Galarraga *et al.*, 2018).

En este artículo estimamos el ascenso del nivel del mar en 11 localidades de la costa vasca, bajo tres escenarios de cambio climático del IPCC (RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5), y utilizando la modelización estocástica que resulta fundamental para (i) entender la gran incertidumbre y los riesgos asociados; (ii) disponer de una sólida base para la estimación de impactos económicos o para guiar la toma de decisiones en materia de adaptación al cambio climático. Para dar respuesta a este objetivo, en el apartado segundo repasamos la literatura científica más reciente que aborda esta problemática; en el apartado tercero presentamos la metodología utilizada y las estimaciones de aumento del nivel del mar obtenidas; finalmente, en el apartado cuarto discutimos las principales conclusiones, en relación a estimaciones previas y a las oportunidades que estos datos presentan de cara al futuro.

## 2. ENFOQUES BASADOS EN RIESGO EN LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

Existe gran incertidumbre respecto a la magnitud y marco temporal de los impactos del cambio climático, y el aumento del nivel del mar no es una excepción. La incertidumbre puede categorizarse en función de su naturaleza, nivel y fuente u origen de la misma (van der Keur *et al.*, 2008). La naturaleza de la incertidumbre se refiere a que esta puede deberse a la variabilidad aleatoria natu-

ral del sistema (*incertidumbre estocástica*) o la falta de conocimiento sobre el mismo. La incertidumbre, a su vez, puede darse en diferentes niveles, abarcando desde la certeza absoluta, que representaría la falta de incertidumbre, hasta la ignorancia total. Además, la incertidumbre puede originarse por fuentes diversas. En el caso del cambio climático, puede haber incertidumbres relacionadas con los datos de partida, los modelos utilizados, los escenarios y marcos conceptuales considerados, las percepciones, etc. (Abadie, 2018; Markandya, 2014; Refsgaard *et al.*, 2013). En este contexto complejo, el IPCC ha optado por una aproximación en la que la incertidumbre de los datos y afirmaciones que se recogen en sus informes se miden de forma cuantitativa (probabilística) o cualitativa, en función de la confianza en la validez de una determinada conclusión (Mastandrea *et al.*, 2010).

Los rangos de probabilidad que presenta el IPCC en sus informes permiten entender el grado de incertidumbre mejor que los valores medios. Por ejemplo, si volvemos a las proyecciones de aumento global del nivel del mar, en el escenario RCP8.5 el aumento medio esperado es de 62 cm, sin embargo el rango *probable* (aquel que presenta una probabilidad de 66-100%) oscila entre 45 cm y 82 cm en el periodo 2081-2100. El rango probable también nos indica que existe una probabilidad de hasta el 33% de que el nivel del mar alcance cifras menores, pero también mayores que dicho rango. En un contexto de cambio climático y de gran incertidumbre, considerar únicamente el rango probable (o su mediana) sin llegar a analizar lo que ocurre en la cola más desfavorable de la distribución suele conllevar la infravaloración de los riesgos, y por tanto, son muchos los autores que lo consideran claramente insuficiente (Hinkel *et al.*, 2015; Nordhaus, 2011; Weitzman, 2013, 2009). Lo que estos autores defienden es que a pesar de que la probabilidad de que este tipo de eventos sucedan es muy pequeña, su impacto puede ser de dimensiones tan importantes que deben examinarse en el marco de las políticas climáticas (Pindyck, 2011). Recientemente, una editorial de la prestigiosa revista científica *Nature Climate Change* insistía precisamente en esta cuestión (Editorial, 2016). Además, el uso de escenarios extremos que consideran la cola superior de la distribución de probabilidades ha sido ya aplicado en casos tan emblemáticos como el del estuario del Támesis en el Reino Unido, ejemplo de buena práctica en materia de prevención de inundaciones. El proyecto Estuario del Támesis 2100 (TE2100) surge para responder al riesgo de inundaciones costeras ante el aumento del nivel del mar como consecuencia del cambio climático, y considera, entre otros muchos aspectos, un escenario extremo de 2,7 m en 2100 (Ranger *et al.*, 2013).

Las medidas de riesgo, comúnmente utilizadas en economía y finanzas para evaluar el riesgo de eventos de baja probabilidad pero elevados impactos económicos, pueden ser utilizadas en contextos de cambio climático y resultar de gran utilidad para la toma de decisiones en situaciones de incertidumbre. Dos medidas comunes

son el valor en riesgo,  $\text{VaR}(\alpha)$ <sup>7</sup>, y la pérdida esperada en un determinado porcentaje de los peores casos,  $\text{ES}(\alpha)$ <sup>8</sup>. La primera medida es la más habitual y representa el impacto o la pérdida correspondiente al percentil ( $\alpha$ ), mientras que la segunda se refiere a la pérdida media cuando se excede el  $\text{VaR}(\alpha)$ . Esta última es considerada un mejor indicador del riesgo debido a la mayor información que suministra de la cola desfavorable de la distribución (Artzner *et al.*, 1999; Hull, 2012).

Estas medidas de riesgo han sido utilizadas muy recientemente para estimar el impacto económico del aumento del nivel del mar y los eventos extremos en las principales ciudades costeras del mundo (Abadie *et al.*, 2016, 2017a). Además de cuantificar el riesgo asociado a estos eventos de baja probabilidad pero impacto extraordinario, esta metodología permite realizar tests de estrés de una manera similar a aquellos tests a los que el regulador bancario ha sometido al sistema bancario. Es decir, para medir la capacidad que tiene un sistema de recuperarse de un *shock*, la denominada resiliencia. Por ejemplo, un plan de ordenación urbana o una infraestructura ubicada en la costa y diseñada en base a criterios medios o en el marco del rango probable, podrían testarse utilizando estos eventos de baja probabilidad para conocer su desempeño o resiliencia (Galarraga *et al.*, 2018). Las medidas de riesgo se utilizan también para el análisis económico-financiero de grandes proyectos de inversión y para el uso de la técnica de opciones reales, ambas técnicas ampliamente utilizadas en el sector energético o en el sector financiero (Abadie, 2014).

La utilización de estas metodologías de riesgo requiere de datos de la distribución de probabilidades, por lo que disponer de datos probabilísticos sobre, por ejemplo el aumento del nivel del mar, resulta indispensable si se quieren mejorar las aproximaciones a emplear en la toma de decisiones para hacer frente al cambio climático.

### 3. ESCENARIOS DE AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR EN LA COSTA VASCA

#### 3.1 Proyecciones regionalizadas y zona de estudio

Los datos de aumento del nivel del mar se han obtenido a partir de Kopp *et al.* (2014), quienes estimaron proyecciones regionalizadas para más de un millar de localidades con mareógrafos considerando tres escenarios de emisión (RCP2.6, 4.5 y 8.5)<sup>9</sup>. En el estudio de Kopp *et al.* (2014) se presenta la distribución de probabilidades para cada escenario a partir de una modelización por procesos que consi-

<sup>7</sup> Medida equivalente al percentil  $\alpha$  de la distribución de probabilidades. Así  $\text{VaR}(95\%)$  es el percentil 95%.

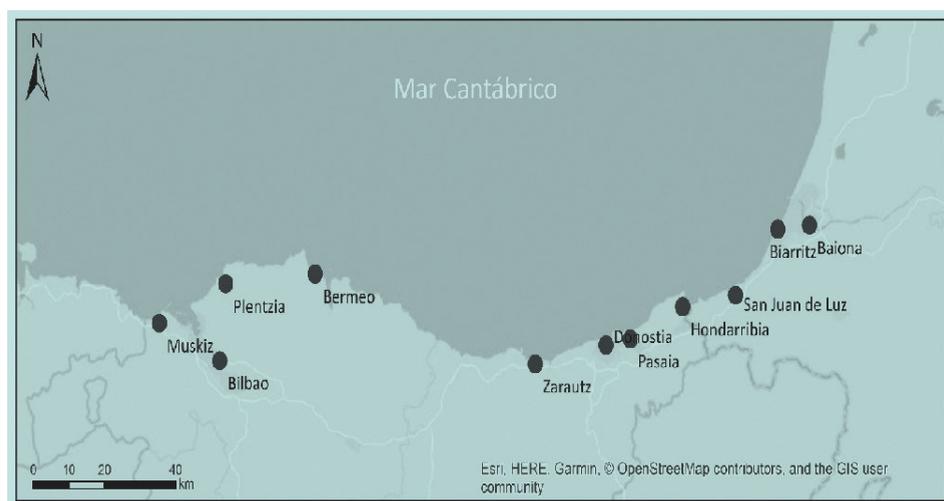
<sup>8</sup> Se corresponde con la media de  $(1-\alpha)\%$  de peores casos. Así,  $\text{ES}(95\%)$  es la media del 5% de los peores casos de la distribución.

<sup>9</sup> El escenario RCP6.0 no fue considerado por estos autores debido a su similitud con el RCP4.5.

dera cuatro componentes de los cambios en el nivel del mar: la dinámica oceánica, los efectos de equilibrio estático, los ajustes isostáticos y otras variables locales no climáticas, como la extracción de agua subterránea, la compactación de sedimentos o procesos tectónicos locales. Además, las estimaciones fuera del rango probable asociadas al riesgo de una mayor contribución de las grandes masas de hielo de Groenlandia y la Antártida se realizan a partir de la opinión de expertos (Bamber y Aspinall, 2013).

Entre las diferentes localidades incluidas en el estudio de Kopp *et al.* (2014) se encuentran los municipios vascos de Bilbao, Pasajes, San Juan de Luz y Bayona. Los datos de partida utilizados para estos municipios se muestran en el cuadro nº 1. Además, se han obtenido por interpolación datos para otros siete municipios para los cuales el aumento del nivel del mar puede representar un riesgo significativo. En total se han estimado proyecciones probabilísticas de aumento del nivel del mar para los siguientes 11 municipios: Donostia-San Sebastián, Bilbao y Bayona son los núcleos principales de población de la costa, y estos dos últimos también tienen zona portuaria, al igual que Pasaia y Bermeo; Hondarribia y su aeropuerto, junto con los municipios costeros de Plentzia, Zarautz, San Juan de Luz y Biarritz, son vulnerables frente el aumento del nivel del mar y los eventos meteorológicos extremos que se registren en la costa. Finalmente, en la zona más occidental está Muskiz, un pequeño municipio seleccionado porque alberga una de las mayores refinerías de petróleo de la península ibérica (Petronor). La ubicación de estas localidades se muestra en el gráfico nº 2.

Gráfico nº 2. LOCALIDADES DE LA COSTA VASCA PARA LAS QUE SE HAN ESTIMADO PROYECCIONES DE AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR



Fuente: Elaboración propia.

**Cuadro nº 1. DATOS DE AUMENTO RELATIVO DEL NIVEL DEL MAR UTILIZADOS PARA CALIBRAR LOS MODELOS ESTOCÁSTICOS**

Los valores se muestran en metros (m.)

Fuente datos	Localidad	Año	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
			50	95	99.5	50	95	99.5	50	95	99.5
Kopp et al, 2014	BILBAO	2030	0.13	0.23	0.29	0.13	0.22	0.28	0.14	0.23	0.29
		2050	0.23	0.41	0.54	0.24	0.41	0.53	0.27	0.45	0.57
		2100	0.45	0.87	1.49	0.55	0.98	1.54	0.71	1.20	1.80
	PASAIA	2030	0.11	0.20	0.25	0.11	0.19	0.24	0.12	0.20	0.25
		2050	0.21	0.35	0.47	0.22	0.35	0.46	0.24	0.39	0.51
		2100	0.39	0.77	1.39	0.49	0.88	1.45	0.66	1.10	1.69
	SAN JUAN DE LUZ	2030	0.11	0.19	0.24	0.11	0.19	0.24	0.12	0.20	0.25
		2050	0.20	0.35	0.47	0.22	0.35	0.46	0.24	0.39	0.51
		2100	0.39	0.76	1.40	0.49	0.88	1.45	0.65	1.10	1.69
	BOUCAU/BAYONA	2030	0.11	0.20	0.25	0.11	0.19	0.24	0.12	0.20	0.25
		2050	0.20	0.35	0.47	0.21	0.35	0.46	0.24	0.39	0.51
		2100	0.39	0.77	1.39	0.49	0.88	1.45	0.65	1.10	1.69

.../...

.../...

Interpolación	MUSKIZ	2030	0.13	0.23	0.29	0.13	0.22	0.28	0.14	0.23	0.29
		2050	0.23	0.41	0.54	0.24	0.41	0.53	0.27	0.45	0.57
		2100	0.45	0.87	1.49	0.55	0.98	1.54	0.71	1.20	1.80
	PLENTZIA	2030	0.13	0.23	0.29	0.13	0.22	0.28	0.14	0.23	0.29
		2050	0.23	0.40	0.53	0.24	0.40	0.52	0.27	0.44	0.56
		2100	0.44	0.86	1.48	0.54	0.97	1.53	0.71	1.19	1.79
	BERMEO	2030	0.12	0.22	0.28	0.12	0.21	0.27	0.13	0.22	0.28
		2050	0.22	0.39	0.52	0.23	0.39	0.51	0.26	0.43	0.55
		2100	0.43	0.84	1.46	0.53	0.95	1.51	0.70	1.17	1.77
	ZARAUZ	2030	0.11	0.21	0.26	0.11	0.20	0.25	0.12	0.21	0.26
		2050	0.21	0.36	0.49	0.22	0.36	0.48	0.25	0.40	0.52
		2100	0.40	0.79	1.41	0.50	0.90	1.47	0.67	1.12	1.72
SAN SEBASTIAN	2030	0.11	0.20	0.25	0.11	0.19	0.24	0.12	0.20	0.25	
	2050	0.21	0.35	0.47	0.22	0.35	0.46	0.24	0.39	0.51	
	2100	0.39	0.78	1.40	0.49	0.89	1.46	0.66	1.11	1.70	
HONDARRIBIA	2030	0.11	0.19	0.24	0.11	0.19	0.24	0.12	0.20	0.25	
	2050	0.20	0.35	0.47	0.22	0.35	0.46	0.24	0.39	0.51	
	2100	0.39	0.76	1.40	0.49	0.88	1.45	0.65	1.10	1.69	
BIARRITZ	2030	0.11	0.20	0.25	0.11	0.19	0.24	0.12	0.20	0.25	
	2050	0.20	0.35	0.47	0.21	0.35	0.46	0.24	0.39	0.51	
	2100	0.39	0.77	1.39	0.49	0.88	1.45	0.65	1.10	1.69	

Nota: Los datos corresponden a tres escenarios de emisión (RCP2.6, 4.5 y 8.5) y tres percentiles de la distribución de probabilidades (percentil 50, 95 y 99.5).

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2 Metodología

Los modelos estocásticos permiten realizar análisis en contextos de incertidumbre que buscan conocer la distribución de los resultados del modelo ejecutando un alto número de realizaciones aleatorias (Refsgaard *et al.*, 2007). En este estudio hemos utilizado dos modelos estocásticos para estimar la distribución de probabilidades del aumento del nivel del mar en la costa vasca, prestando especial atención al extremo más desfavorable de la distribución.

El primero es un Modelo Browniano Geométrico (más conocido por sus siglas en inglés GBM), que es un modelo estocástico que nos permite obtener datos continuos en el tiempo y ya ha sido utilizado anteriormente por Abadie *et al.* (2017a, 2016), donde puede encontrarse una descripción detallada de la aplicación de dicho modelo. En este trabajo los parámetros del modelo (deriva y volatilidad) se calibraron a partir de los percentiles 50% y 95% de Kopp *et al.* (2014) para cada ciudad, obteniendo así unas funciones de distribución que son log-normales.

El segundo modelo es una Distribución del Valor Extremo (Generalized Extreme Value Distribution, GEV), ampliamente utilizado para modelizar los valores extremos de las distribuciones de probabilidad (Losada *et al.*, 2013; Vitousek *et al.*, 2017), que hemos calibrado con los percentiles 50%, 95% y 99,5% publicados por Kopp *et al.* (2014). La distribución tiene tres parámetros y combina las distribuciones de valores extremos de Gumbel, Fréchet y Weibull. La función de distribución acumulativa conocida como GEV presenta una función de distribución que se describe en las ecuaciones 1 y 2, en función del valor de  $\xi$ :

$$F(x) = e^{-(1+\xi\frac{x-\mu}{\sigma})^{-\frac{1}{\xi}}}, 1 + \xi\frac{x-\mu}{\sigma} > 0 \quad (1)$$

$$F(x) = e^{-e^{-(\frac{x-\mu}{\sigma})}}, \xi = 0 \quad (2)$$

Donde el término  $\mu \in P$  representa la localización,  $\sigma > 0$  la escala y  $\xi \in P$  la forma o índice de la cola de la distribución. Así, la función de densidad de probabilidades viene determinada por la ecuación 3 o 4, en función de si  $\xi$  es distinto o igual a cero, respectivamente:

$$\frac{1}{\sigma} \left(1 + \xi\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-\frac{\xi+1}{\xi}} e^{-(1+\xi\frac{x-\mu}{\sigma})^{-\frac{1}{\xi}}}, \xi \neq 0 \quad (3)$$

$$\frac{1}{\sigma} \left(e^{\left[\frac{x-\mu}{\sigma} - e^{-\frac{x-\mu}{\sigma}}\right]}\right), \xi = 0 \quad (4)$$

La media de la distribución de probabilidades puede estimarse tal y como se muestra a continuación:

$$\mu + \sigma(\Gamma(1 - \xi) - 1)/\xi, \text{ si } \xi \neq 0, \xi < 1 \quad (5)$$

$$\mu + \sigma\gamma, \text{ si } \xi \neq 0, \xi = 0. \quad (6)$$

$$\infty, \text{ si } \xi \geq 1 \quad (7)$$

Donde  $\Gamma$  es la función gamma y  $\gamma$  es la constante de Euler.

### 3.3 Resultados

El aumento del nivel del mar en la costa vasca se ha estimado para tres escenarios de emisión (RCP2.6, 4.5 y 8.5), calibrando dos modelos estocásticos diferentes y tomando como base de referencia el año 2000. Los resultados para los años 2030, 2050 y 2100, utilizando el modelo GBM, se muestran en el gráfico nº 2. En general, las diferencias entre localidades son muy pequeñas, aunque el aumento sí que varía en función de si miramos el valor medio o la cola de la distribución. También hay diferencias entre escenarios, especialmente a medida que avanzamos hacia finales de siglo.

Para 2030, el aumento medio esperado es de entre 12 cm y 15 cm en función de la localidad y el escenario. Sin embargo, este aumento del nivel del mar es considerablemente mayor si tomamos los valores más extremos: el VaR(95%) representa una subida del nivel del mar que tiene una probabilidad del 5% de ser superada; el ES(95%) es superior al VaR, puesto que representa el valor medio del 5% de peores casos. En este caso el VaR(95%) nos indica que existe un 5% de probabilidad de que en 2030 el ascenso del nivel del mar sea de entre 19-23 cm, mientras que el ES(95%) presenta valores de entre 22-27 cm.

Para 2050 el valor medio esperado es de 21-29 cm, mientras que el VaR(95%) es de 35-45 cm y el ES(95%) muestra aumentos de 40-52 cm. Los valores obtenidos dependen fundamentalmente de los escenarios y se observa una mayor variabilidad (es decir, el rango es mayor) que en 2030, puesto que los escenarios divergen y se distancian entre sí con el tiempo. Para 2100 las diferencias entre escenarios son aún mayores: el aumento medio esperado es de entre 42 cm y 75 cm, en los escenarios RCP2.6 y 8.5 respectivamente; el VaR(95%) 76 cm (valor inferior del RCP2.6) y 1.2 m (RCP8.5); finalmente, se obtiene valores de ES(95%) de entre 91 cm (RCP2.6) y 1.4 m (RCP8.5).

Los resultados obtenidos utilizando el segundo modelo estocástico GEV, que permite una mejor calibración de la cola de la distribución, están en línea con los presentados en el cuadro nº 2. Los datos indican, al igual que en el caso anterior, que el aumento del nivel del mar es similar en todos los escenarios hasta 2050, momento a partir del cual las diferencias se hacen muy notables (cuadro nº 3). Los resultados varían ligeramente entre municipios, aunque las principales diferencias se deben al escenario de emisión considerado, así como a si se analiza la media o los valores extremos de la distribución de probabilidades.

**Cuadro nº 2. MODELIZACIÓN DEL AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR PARA ONCE LOCALIDADES DE LA COSTA VASCA BAJO TRES ESCENARIOS DE EMISIÓN, UTILIZANDO EL MODELO ESTOCÁSTICO GBM**

Los resultados se muestran en metros (m)

Localidad	Año	Media			VaR(95%)			ES(95%)		
		RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
BAIONA	2030	0.12	0.12	0.13	0.20	0.19	0.20	0.24	0.22	0.23
	2050	0.21	0.22	0.25	0.35	0.35	0.39	0.41	0.40	0.44
	2100	0.42	0.52	0.68	0.77	0.88	1.10	0.93	1.03	1.27
BERMEO	2030	0.13	0.13	0.14	0.22	0.21	0.22	0.26	0.24	0.25
	2050	0.24	0.25	0.27	0.39	0.39	0.43	0.46	0.45	0.50
	2100	0.47	0.57	0.73	0.84	0.95	1.17	1.01	1.11	1.35
BIARRITZ	2030	0.12	0.12	0.13	0.20	0.19	0.20	0.23	0.22	0.23
	2050	0.21	0.22	0.25	0.35	0.35	0.39	0.41	0.40	0.44
	2100	0.42	0.52	0.68	0.77	0.88	1.10	0.92	1.03	1.27
BILBAO	2030	0.14	0.14	0.15	0.23	0.22	0.23	0.27	0.25	0.26
	2050	0.24	0.25	0.28	0.41	0.41	0.45	0.48	0.47	0.52
	2100	0.49	0.58	0.75	0.87	0.98	1.20	1.04	1.14	1.38
DONOSTIA	2030	0.12	0.12	0.13	0.20	0.19	0.20	0.24	0.22	0.23
	2050	0.22	0.23	0.25	0.35	0.35	0.39	0.41	0.40	0.45
	2100	0.43	0.53	0.70	0.78	0.89	1.11	0.93	1.04	1.27

.../...

.../...

HONDARRIBIA	2030	0.12	0.12	0.13	0.20	0.19	0.20	0.24	0.22	0.23
	2050	0.22	0.23	0.25	0.35	0.35	0.39	0.41	0.40	0.44
	2100	0.43	0.52	0.69	0.78	0.88	1.10	0.93	1.03	1.26
MUSKIZ	2030	0.14	0.14	0.15	0.23	0.22	0.23	0.27	0.25	0.26
	2050	0.25	0.26	0.29	0.41	0.41	0.45	0.48	0.47	0.51
	2100	0.49	0.59	0.75	0.87	0.98	1.20	1.04	1.14	1.38
PASAIA	2030	0.12	0.12	0.13	0.20	0.19	0.20	0.24	0.22	0.23
	2050	0.22	0.23	0.25	0.35	0.35	0.39	0.40	0.40	0.44
	2100	0.42	0.52	0.69	0.77	0.88	1.10	0.93	1.03	1.26
PLENTZIA	2030	0.14	0.13	0.14	0.23	0.22	0.23	0.27	0.25	0.26
	2050	0.24	0.25	0.28	0.40	0.40	0.44	0.47	0.47	0.51
	2100	0.48	0.58	0.74	0.86	0.97	1.19	1.03	1.13	1.37
SAN JUAN DE LUZ	2030	0.12	0.12	0.13	0.19	0.19	0.20	0.22	0.22	0.23
	2050	0.21	0.23	0.25	0.35	0.35	0.39	0.41	0.40	0.44
	2100	0.42	0.52	0.68	0.76	0.88	1.10	0.91	1.03	1.27
ZARAUTZ	2030	0.12	0.12	0.13	0.21	0.20	0.21	0.24	0.23	0.24
	2050	0.23	0.23	0.26	0.36	0.36	0.40	0.42	0.41	0.46
	2100	0.44	0.54	0.70	0.79	0.90	1.12	0.95	1.06	1.29

Fuente: Elaboración propia.

**Cuadro nº 3. MODELIZACIÓN DEL AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR PARA ONCE LOCALIDADES DE LA COSTA VASCA BAJO TRES ESCENARIOS DE EMISIÓN, UTILIZANDO EL MODELO ESTOCÁSTICO GEV**

Los resultados se muestran en metros (m)

Localidad	Año	Media			VaR(95%)			ES(95%)		
		RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
BAIONA	2030	0.11	0.11	0.12	0.20	0.19	0.20	0.22	0.21	0.22
	2050	0.21	0.22	0.25	0.35	0.35	0.39	0.40	0.40	0.44
	2100	0.44	0.54	0.70	0.77	0.88	1.10	1.03	1.12	1.35
BERMEO	2030	0.13	0.12	0.13	0.22	0.21	0.22	0.25	0.24	0.25
	2050	0.24	0.24	0.27	0.39	0.39	0.43	0.45	0.44	0.48
	2100	0.48	0.58	0.75	0.84	0.95	1.17	1.10	1.19	1.43
BIARRITZ	2030	0.11	0.11	0.12	0.20	0.19	0.20	0.22	0.21	0.22
	2050	0.21	0.22	0.25	0.35	0.35	0.39	0.40	0.40	0.44
	2100	0.44	0.54	0.70	0.77	0.88	1.10	1.03	1.12	1.35
BILBAO	2030	0.13	0.13	0.14	0.23	0.22	0.23	0.26	0.25	0.26
	2050	0.24	0.25	0.28	0.41	0.41	0.45	0.47	0.46	0.50
	2100	0.50	0.60	0.76	0.87	0.98	1.20	1.13	1.22	1.46
DONOSTIA	2030	0.11	0.11	0.12	0.20	0.19	0.20	0.22	0.21	0.22
	2050	0.22	0.23	0.25	0.35	0.35	0.39	0.41	0.40	0.44
	2100	0.44	0.54	0.71	0.78	0.89	1.11	1.04	1.13	1.36

.../...

.../...

HONDARRIBIA	2030	0.11	0.11	0.12	0.19	0.19	0.20	0.22	0.21	0.22
	2050	0.22	0.23	0.25	0.35	0.35	0.39	0.40	0.40	0.44
	2100	0.44	0.54	0.70	0.76	0.88	1.10	1.03	1.12	1.35
MUSKIZ	2030	0.13	0.13	0.14	0.23	0.22	0.23	0.26	0.25	0.26
	2050	0.24	0.25	0.28	0.41	0.41	0.45	0.47	0.46	0.50
	2100	0.50	0.60	0.76	0.87	0.98	1.20	1.13	1.22	1.46
PASAIA	2030	0.11	0.11	0.12	0.20	0.19	0.20	0.22	0.21	0.22
	2050	0.22	0.23	0.25	0.35	0.35	0.39	0.40	0.40	0.44
	2100	0.44	0.54	0.71	0.77	0.88	1.10	1.03	1.12	1.35
PLENTZIA	2030	0.13	0.13	0.14	0.23	0.22	0.23	0.25	0.25	0.26
	2050	0.24	0.25	0.28	0.40	0.40	0.44	0.46	0.45	0.49
	2100	0.49	0.59	0.76	0.86	0.97	1.19	1.12	1.21	1.45
SAN JUAN DE LUZ	2030	0.11	0.11	0.12	0.19	0.19	0.20	0.21	0.21	0.22
	2050	0.21	0.23	0.25	0.35	0.35	0.39	0.40	0.40	0.44
	2100	0.44	0.54	0.70	0.76	0.88	1.10	1.03	1.12	1.35
ZARAUZ	2030	0.12	0.11	0.12	0.21	0.20	0.21	0.23	0.22	0.23
	2050	0.23	0.23	0.26	0.36	0.36	0.40	0.42	0.41	0.45
	2100	0.45	0.55	0.72	0.79	0.90	1.12	1.06	1.14	1.38

Fuente: Elaboración propia.

En 2030, el rango de aumento medio del nivel del mar esperado en las diferentes localidades estudiadas es de entre 11 y 14 cm en función del municipio y escenario considerado. Sin embargo, al analizar el percentil 95 o la media del 5% de peores casos se obtienen valores sustancialmente mayores, de 19-23 cm para el VaR(95%) y 21-26 cm para el ES(95%). Estos resultados son muy similares a los obtenidos con el primer modelo estocástico. En 2050, el aumento promedio varía entre 21 y 28 cm, mientras que el VaR(95%) alcanza 35-45 cm y el ES(95%) 40-50 cm. Las estimaciones obtenidas para finales de siglo (2100) muestran un aumento medio del nivel del mar de 44-76 cm. Los valores extremos de la distribución calculados muestran rangos de 77-120 cm y 103-146 cm para el VaR(95%) y el ES(95%), respectivamente.

En resumen, los resultados de ambos modelos muestran que la diferencia entre los valores centrales de la distribución y el extremo de alto riesgo representado por el VaR(95%) y el ES(95%) aumenta con el tiempo, de la misma forma que aumenta también la diferencia entre un escenario de emisión optimista (RCP2.6) y uno pesimista (RCP8.5). Nótese que los valores del VaR(95%) son idénticos en los cuadros 1 y 2, puesto que el dato del percentil 95 se ha utilizado para calibrar los dos modelos. Los valores medios obtenidos con ambos modelos son muy similares y, aunque aumentan con el tiempo, son siempre inferiores al 5%; sin embargo, los valores difieren en mayor medida al analizar los resultados de la cola de la distribución, es decir, el ES(95%). En 2050 se observan diferencias de hasta 2 cm (un 4%), que aumenta hasta 12 cm (11%) en 2100.

#### 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este trabajo presenta novedades importantes respecto a los estudios existentes actualmente sobre el aumento del nivel del mar en la costa vasca como consecuencia del cambio climático. En primer lugar, presentamos datos que abarcan un periodo amplio desde 2030 hasta 2100, en lugar de mostrar únicamente valores a finales de siglo. Y con una metodología que permite obtener los valores para cualquier año comprendido entre estas fechas. Esta aportación es muy relevante si tenemos en cuenta que resulta necesario conciliar plazos de planificación largos (de 10 o 20 años, por ejemplo, para el caso de planes de ordenación urbana o infraestructuras críticas) con otras decisiones más a corto plazo que responden a ciclos políticos de 4 años. Resulta destacable el hecho de que de cara a la planificación en materia de adaptación en el País Vasco los próximos 10 o 12 años (hasta 2030) serán, probablemente, los más importantes, aunque no debe perderse de vista el largo plazo debido a la naturaleza de algunas construcciones o infraestructuras.

En un contexto de alta incertidumbre es necesario disponer no solo de medidas flexibles que puedan adaptarse a una variedad de situaciones, sino también de capacidades de monitorización y actualización periódica de los datos. De la misma

forma que el último informe del IPCC incluyó un nuevo grupo de escenarios de emisión (los citados RCPs), es probable que se den otro tipo actualizaciones periódicas más o menos importantes. Por ello, parece relevante destacar que este tipo de análisis deberá ir actualizándose cada cierto tiempo a la luz de nuevos datos y nuevas metodologías.

Otra contribución importante de este trabajo tiene que ver con la incorporación de la incertidumbre en el análisis estadístico de las proyecciones de aumento del nivel del mar. A lo largo de este artículo hemos insistido en la necesidad de considerar los extremos más negativos de la distribución de probabilidades, además de los valores medios esperados o los rangos probables. Conocer los impactos asociados a los eventos de baja probabilidad, representados por el VaR(95%) y el ES(95%), puede resultar decisivo para no infravalorar el riesgo. Y como citábamos anteriormente, esta información puede permitirnos realizar test de estrés para medir la efectividad de distintos tipos de planes o proyectos ante situaciones adversas poco probables e identificar aquellas opciones más robustas. Es decir, medir la capacidad de resiliencia de nuestros sistemas. Además, trabajar con distribuciones de probabilidades resulta imprescindible para aplicar metodologías más sofisticadas para el análisis de inversiones, la estimación de impactos económicos y ambientales o la priorización en la toma de decisiones.

Otra aplicación muy relevante de este tipo de enfoque tiene que ver con la definición de niveles de riesgo aceptables (Galarraga *et al.*, 2018). Mientras que el debate y la gestión de los riesgos climáticos están actualmente alejados de la sociedad y dominados por discusiones complejas de contenido muy técnico (Akerlof *et al.*, 2016), la participación pública se considera uno de los pilares de la gobernanza en general y la gobernanza climática en particular (Few *et al.*, 2007; Dietz, 2013; Jodoin *et al.*, 2015). Es por ello que Galarraga *et al.* (2018) proponen medir el riesgo en términos de daños económicos que pueden ser asumidos (sea como un porcentaje del PIB o de un presupuesto público o privado) para decidir niveles de riesgo aceptables. Es decir, para definir un cierto umbral de apetito al riesgo.

En comparación con estudios previos, los resultados obtenidos muestran aumentos del nivel del mar mayores. Chust *et al.* (2010) presentaron un rango probable de 33-49 cm (escenario A1B) y 29-45 (A2) para final de siglo, frente al aumento medio esperado de 42-49 cm (RCP2.6), 52-59 cm (RCP4.5) y 68-75 cm (RCP8.5), según los datos del cuadro nº 2. Además, hay que tener en cuenta que este aumento es aún mayor si nos fijamos en el extremo superior de la distribución de probabilidades (VaR y ES): es decir, hay riesgos más elevados que deberíamos tener en cuenta. Aunque Losada *et al.* (2014) incorporan escenarios de entre 40 cm y 60 cm (RCP4.5 y 8.5, respectivamente), para la estimación de impactos considera aumentos mayores, de 50 cm, 85 cm y 2 m a finales de siglo. Este último ejercicio, aunque es una aproximación determinista, está en línea con el enfoque defendido en este trabajo de que resulta necesario considerar los escenarios extremos.

Por último, de los resultados de este trabajo se desprende un mensaje claro: las diferencias entre la media y los peores casos de aumento del nivel del mar hasta 2050 son muy pequeñas, en ningún caso superan los 4 cm, pero ante la larga vida útil de muchas inversiones e infraestructuras resulta imprescindible tener en cuenta los riesgos a largo plazo. Y estos están fundamentalmente determinados por el peor escenario (Abadie, 2018), lo que hace necesario considerar esta posibilidad en las decisiones de inversión en zonas costeras.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABADIE, L.M. (2018): «Sea level damage risk with probabilistic weighting of IPCC scenarios: An application to major coastal cities», *Journal of Cleaner Production*, 175: 582–598.
- (2014): «Economic foundations of energy investments», en ANSUATEGI, A.; DELGADO, J.; GALARRAGA, I. (Eds.), *Green Energy and Efficiency - An Economic Perspective*, Springer London, London.
- ABADIE, L.M.; GALARRAGA, I.; SAINZ DE MURIETA, E. (2017a): «Understanding risks in the light of uncertainty: low-probability, high-impact coastal events in cities», *Environmental Research Letters*, 12: 14017.
- (2017b): «Investing in adaptation: flood risk and real option application to Bilbao», *Environmental Modelling and Software*, 95: 76–89.
- (2016): «Climate risk assessment under uncertainty: an application to main European coastal cities», *Frontiers in Marine Science*, 3: 1–13.
- AKERLOF, K.L.; ROWAN, K.E.; LA PORTE, T.; BATTEEN, B.K.; ERNST, H.; SKLAREW, D.M. (2016): «Risky business: Engaging the public on sea level rise and inundation», *Environmental Science and Policy*, 66: 314–323.
- ARTZNER, P.; DELBAEN, F.; EBER, J.-M.; HEATH, D. (1999): «Coherent Measures of Risk», *Mathematical Finance*, 9: 203–228.
- BAMBER, J.L.; ASPINALL, W.P. (2013): «An expert judgement assessment of future sea level rise from the ice sheets», *Nature Climate Change*, 3: 424–427.
- CEARRETA, A.; IRABIEN, M.J.; PASCUAL, A. (2004): «Human activities along the Basque coast during the last two centuries: geological perspective of recent anthropogenic impact on the coast and its environmental consequences», en BORJA, A.; COLLINS, M. (Eds.), *Oceanography and Marine Environment of the Basque Country*, Elsevier Oceanography Series. Elsevier, 27–50.
- CHURCH, J.A.; WHITE, N.J. (2006): «A 20th century acceleration in global sea-level rise», *Geophysical Research Letters*, 33.
- CHUST, G.; CABALLERO, A.; MARCOS, M.; LIRIA, P.; HERNÁNDEZ, C.; BORJA, Á. (2010): «Regional scenarios of sea level rise and impacts on Basque (Bay of Biscay) coastal habitats, throughout the 21st century», *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 87: 113–124.
- DIETZ, T. (2013): «Bringing values and deliberation to science communication», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110: 14081–14087.
- EDITORIAL (2016): «The devil is in the deep tail», *Nature Climate Change*, 6: 431.
- FEW, R.; BROWN, K.; TOMPKINS, E.L. (2007): «Public participation and climate change adaptation: avoiding the illusion of inclusion», *Climate Policy*, 7: 46–59.
- GALARRAGA, I.; SAINZ DE MURIETA, E.; MARKANDYA, A.; ABADIE, L.M. (2018): Addendum to 'Understanding risks in the light of uncertainty: low-probability, high-impact coastal events in cities', *Environmental Research Letters*, 13: 29401.
- GOBIERNO VASCO (2015): «Estrategia de Cambio Climático 2050 del País Vasco - Fichas de acciones», Vitoria-Gasteiz.

- GÓMEZ URANGA, M. (2003): *Basque economy: from industrialization to globalization*, Basque textbooks series, Center for Basque Studies, University of Nevada, Reno, Reno.
- GRINSTED, A.; JEVREJEVA, S.; RIVA, R.; DAHL-JENSEN, D. (2015): «Sea level rise projections for northern Europe under RCP8,5», *Climate Research*, 64: 15–23.
- HARDY, R.D.; NUSE, B.L. (2016): «Global sea-level rise: weighing country responsibility and risk», *Climatic Change*, 137: 333–345.
- HAY, C.C.; MORROW, E.; KOPP, R.E.; MITROVICA, J.X. (2015): «Probabilistic reanalysis of twentieth-century sea-level rise», *Nature*, 517: 481–484.
- HINKEL, J.; JAEGER, C.; NICHOLLS, R.J.; LOWE, J.; RENN, O.; PEIJUN, S. (2015): «Sea-level rise scenarios and coastal risk management», *Nature Climate Change*, 5: 188–190.
- HULL, J. (2012): *Options, futures, and other derivatives*, 8th ed. Pearson/Prentice Hall, Harlow.
- IPCC (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- (2012): *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- JACKSON, L.P.; JEVREJEVA, S. (2016): «A probabilistic approach to 21st century regional sea-level projections using RCP and High-end scenarios», *Global Planetary Change*, 146: 179–189.
- JODOIN, S.; DUYCK, S.; LOFTS, K. (2015): «Public Participation and Climate Governance: An Introduction», *Review of European, Comparative & International Environmental Law*, 24: 117–122.
- KOPP, R.E.; HORTON, R.M.; LITTLE, C.M.; MITROVICA, J.X.; OPPENHEIMER, M.; RASMUSSEN, D.J.; STRAUSS, B.H.; TEBALDI, C. (2014): «Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites», *Earth's Future*, 2: 383–406.
- LOSADA, I.J.; IZAGUIRRE, C.; DÍAZ, P. (2014): *Cambio climático en la Costa Española*, Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.
- LOSADA, I.J.; REGUERO, B.G.; MÉNDEZ, F.J.; CASTANEDO, S.; ABASCAL, A.J.; MÍNGUEZ, R. (2013): «Long-term changes in sea-level components in Latin America and the Caribbean», *Global Planetary Change*, 104: 34–50.
- MARKANDYA, A. (2014): «Incorporating climate change into adaptation programmes and project appraisal: Strategies for uncertainty», en MARKANDYA, A.; GALARRAGA, I.; SAINZ DE MURIELA, E. (eds.), *Routledge Handbook of the Economics of Climate Change Adaptation*, Routledge International Handbooks. Routledge, 97–119, New York.
- MASTANDREA, M.D.; FIELD, C.B.; STOCKER, T.F.; EDENHOFER, O.; EBI, K.L.; FRAME, D.J.; HELD, H.; KRIEGLER, E.; MACH, K.J.; MATSCHOSS, P.R.; PLATTNER, G.K.; YOHE, G.W.; ZWIERS, F.W. (2010): *Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- MCGRANAHAN, G.; BALK, D.; ANDERSON, B. (2007): «The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones», *Environment and Urbanization*, 19: 17–37.
- NORDHAUS, W.D. (2011): «The economics of tail events with an application to climate change», *Review of Environmental Economics and Policy*, 5: 240–257.
- PINDYCK, R.S. (2011): «Fat tails, thin tails, and climate change policy», *Review of Environmental Economics and Policy*, 5: 258–274.
- RANGER, N.; REEDER, T.; LOWE, J. (2013): «Addressing ‘deep’ uncertainty over long-term climate in major infrastructure projects: four innovations of the Thames Estuary 2100 Project». *EURO Journal on Decision Processes*, 1: 233–262.
- REFSGAARD, J.C.; ARNBORG-NIELSEN, K.; DREWS, M.; HALSNÆS, K.; JEPPESEN, E.; MADSEN, H.; MARKANDYA, A.; OLESEN, J.E.; PORTER, J.R.; CHRISTENSEN, J.H. (2013): «The role of uncertainty in climate change adaptation strategies—A Danish water management

example», *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18: 337–359.

- REFSGAARD, J.C.; VAN DER SLUIJS, J.P.; HØJBERG, A.L.; VANROLLEGHEM, P.A. (2007): «Uncertainty in the environmental modelling process – A framework and guidance», *Environmental Modelling and Software*, 22: 1543–1556.
- SLANGEN, A.B.A.; CARSON, M.; KATSMAN, C.A.; WAL, R.S.W.; VAN DE, KÖHL, A.; VERMEERSSEN, L.L.A.; STAMMER, D. (2014): «Projecting twenty-first century regional sea-level changes», *Climatic Change*, 124: 317–332.
- VAN DER KEUR, P.; HENRIKSEN, H.J.; REFSGAARD, J.C.; BRUGNACH, M.; PAHL-WOSTL, C.; DEWULF, A.; BUITEVELD, H. (2008): «Identification of major sources of uncertainty in current IWRM practice, Illustrated for the Rhine Basin», *Water Resources Management*, 22: 1677–1708.
- VITOUSEK, S.; BARNARD, P.L.; FLETCHER, C.H.; FRAZER, N.; ERIKSON, L.; STORLAZZI, C.D. (2017): «Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sea-level rise», *Scientific Reports*, 7: 1399.
- WATSON, C.S.; WHITE, N.J.; CHURCH, J.A.; KING, M.A.; BURGETTE, R.J.; LEGRESY, B. (2015): «Unabated global mean sea-level rise over the satellite altimeter era», *Nature Climate Change*, 5: 565–568.
- WEITZMAN, M.L. (2013): «A precautionary tale of uncertain tail fattening», *Environmental and Resource Economics*, 55: 159–173.
- (2009): «On modeling and interpreting the economics of catastrophic climate change», *Review of Economics and Statistics*, 91: 1–19.
- WONG, P.P.; LOSADA, I.J.; GATTUSO, J.P.; HINKEL, J.; KHATTABI, A.; MCINNES, K.L.; SAITO, Y.; SALLENGER, A. (2014): «Coastal systems and low-lying areas», en FIELD, C.B.; BARROS, V.R.; DOKKEN, D.J.; MACH, K.J.; MASTRANDEA, M.D.; BILIR, T.E.; CHATTERJEE, M.; EBI, K.L.; ESTRADA, Y.O.; GENOVA, R.C.; GIRMA, B.; KISSEL, E.S.; LEVY, A.N.; MACCRACKEN, S.; MASTRANDEA, P.R.; WHITE, L.L. (eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 361–409, Cambridge.
- YI, S.; SUN, W.; HEKI, K.; QIAN, A. (2015): «An increase in the rate of global mean sea level rise since 2010», *Geophysical Research Letters*, 42: 3998–4006.