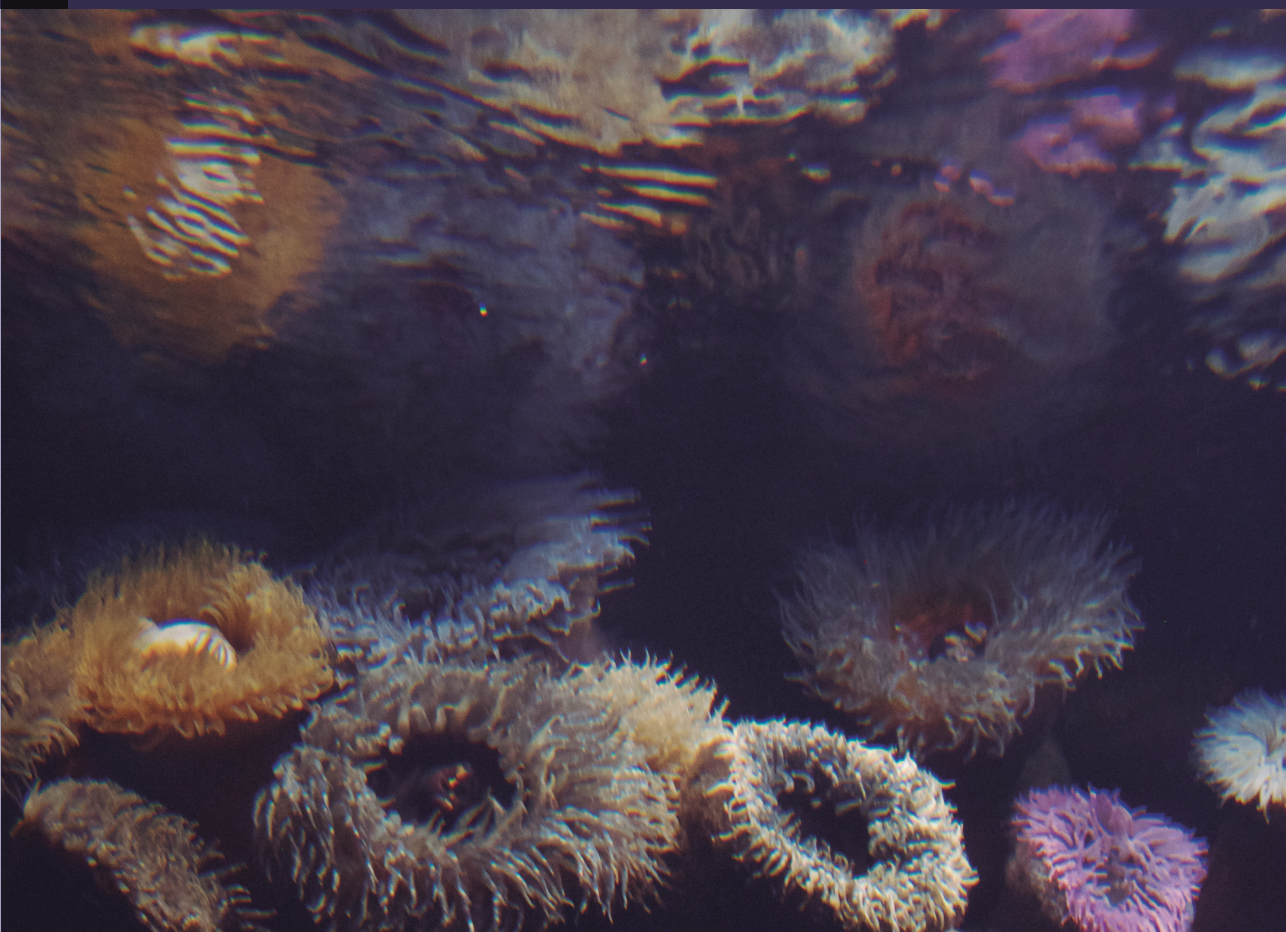


EKONOMIAZ

ONOMIAZ

I · 2020

**Adaptación al cambio climático.
Aportaciones desde la economía**



EKONOMIAZ

N.º 97 - 1º SEMESTRE - 2020

EUSKO JAURLARITZA



GOBIERNO VASCO

OGASUN ETA EKONOMIA
SAILA

DEPARTAMENTO DE HACIENDA
Y ECONOMÍA

Eusko Jaurlaritzaren Argitalpen Zerbitzu Nagusia

Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco

Vitoria-Gasteiz, 2020

ERREDAKZIO KONTSEILUA / CONSEJO DE REDACCIÓN

Jordi Campàs Velasco (Zuzendaria / Director)

Ogasun eta Ekonomia Saila - Eusko Jaurlaritza / Departamento de Hacienda y Economía - Gobierno Vasco

José Ignacio Jaca Michelena (Zuzendariordea / Subdirector)

Ogasun eta Ekonomia Saila - Eusko Jaurlaritza / Departamento de Hacienda y Economía - Gobierno Vasco

Jon Barrutia Güenaga Euskal Herriko Unibertsitatea - Universidad del País Vasco (EHU-UPV)

Ibon Galarraga Gallastegui (Basque Centre for Climate Change-BC3)

Mikel Navarro Arancegui (Deustuko Unibertsitatea - Universidad de Deusto)

Arantxa Rodríguez Álvarez Euskal Herriko Unibertsitatea - Universidad del País Vasco (EHU-UPV)

Arantza Ugidos Olazabal Euskal Herriko Unibertsitatea - Universidad del País Vasco (EHU-UPV)

Elvira Uyarra Delgado (Universidad de Manchester - University of Manchester)

AHOLKU KONTSEILUA / CONSEJO ASESOR

Philip Arestis (U. Cambridge)

Gabriela Dutrénit (U. Autónoma Metropolitana, U. Xochimilco)

Mikel Landabaso (European Commission)

Matilde Mas (U. Valencia, IME)

Vicente Ortún (U. Pompeu Fabra)

Thomas Palley (Economics for Democratic & Open Societies)

Jean Pierre Seclen (U. Católica Perú)

Paul Benneworth (U. Twente)

David Heres del Valle (CIDE, México)

Julio López Laborda (U. Zaragoza)

Kevin Morgan (U. Cardiff)

Carlos Javier Rodríguez (U. La Laguna)

Göran Roos (Government of South Australia)

Elena Stancanelli (CNRS París)

AURKEZPENA

Ekonomiaz nazioarteko seihilabetekaria da, 1985etik Eusko Jaurlaritzaren Ogasun eta Ekonomia Sailak argitaratuta. Erredakzio Kontseilu profesional batek zuzentzen du eta bere helburu nagusia analisia eta eztabaida ekonomikoa bultzatzea da, herrialdeko ikuspuntuarekin eta arreta berezia jartzen eremu aplikatuari eta euskal ekonomiari. Argitalpenaren profila eta helburuak ale honen amaieran eta aldizkariaren web orrian kontsulta daitezke.

PRESENTACIÓN

Ekonomiaz es una revista semestral con proyección internacional, editada desde 1985 por el Departamento de Hacienda y Economía del Gobierno Vasco y dirigida por un Consejo de Redacción profesional, que tiene por objeto el fomento del análisis y el debate económico con un enfoque regional y especial atención al campo aplicado a la economía vasca. La línea editorial y objetivos de la revista se pueden consultar al final de este ejemplar y en la página web de *Ekonomiaz*.

ADMINISTRAZIOA ETA ERREDAKZIOA / REDACCIÓN Y ADMINISTRACIÓN

Eusko Jaurlaritza - Gobierno Vasco

Ogasun eta Ekonomia Saila - Departamento de Hacienda y Economía

Donostia-San Sebastián, 1 - 01010 Vitoria-Gasteiz - Álava (Spain)

945 01 90 38 Administrazioa - Administración / 945 01 90 36 Erredakzioa - Redacción

Web: <http://www1.euskadi.net/ekonomiaz> - E-mail: ekonomiaz@euskadi.eus

JABETZA ESKUBIDEAK

*Ekonomiaz*ek, hau da, Euskal Autonomia Erkidegoko Administrazioak, *Ekonomiaz* aldizkarian argitaratuko diren artikuluen jabetza eskubide guztiak dauzka, zeintzuk Creative Commons  lizenziaren arabera kudeatuko diren.

DERECHOS DE PROPIEDAD

Ekonomiaz (la Administración General de la Comunidad Autónoma de Euskadi) es la titular de todos los derechos de propiedad intelectual de los artículos originales publicados en *Ekonomiaz*, que serán gestionados conforme a la licencia Creative Commons .

Edita: Eusko Jaurlaritzaren Argitalpen Zerbitzu Nagusia
Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco
Donostia-San Sebastián, 1 – 01010 Vitoria-Gasteiz

Tirada: 500 ejemplares

Maquetación y montaje: Miren Unzurrunzaga Schmitz

Impresión:

Depósito Legal:

ISSN: 0213-3865

E-ISSN: 2340-4051

Nota de Redacción: La Revista *Ekonomiaz* no se hace responsable ni comparte necesariamente las opiniones expresadas por los autores de las colaboraciones, que las formulan bajo su exclusiva responsabilidad.

Erredakzioaren oharra: *Ekonomiaz* aldizkariak ez du erantzukizunik lankidetzen autoreek adierazten dituzten iritzia eta, eta ez du nahitaez bat egiten iritzi horiekin. Autoreek, iritzi horiek, beraien erantzukizunpean bakarrik ematen dituzte.

Editorial note: The journal *Ekonomiaz* accepts no liability for and does not necessarily share the opinions expressed by the collaborators. Their opinions are the sole responsibility of them.

SUMARIO

ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO. APORTACIONES DESDE LA ECONOMÍA ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE. CONTRIBUTIONS FROM ECONOMICS

Coordinadores:
Elisa Sainz de Murieta e Ibon Galarraga

Presentación	7	
Aurkezpena	20	
Presentation	32	
Macro-economic assessment of climate change impacts: methods and findings	44	Francesco Bosello Ramiro Parrado
Portfolio analysis as a means of managing uncertainties in climate change adaptation: some initial reflections	62	Alistair Hunt Filippo Fraschini
Financiando las políticas climáticas y de sostenibilidad: el impacto de los bonos sostenibles en el País Vasco <i>Financing climate and sustainability policies: the impact of sustainability bonds on the Basque Country</i>	82	Itziar Ruiz de Gauna Ibon Galarraga Nuria Osés-Eraso Patxi Greño
La adaptación del sector energético al cambio climático <i>Adapting the energy sector to climate change</i>	112	Giuliano Girardi José Carlos Romero Pedro Linares
¿Qué beneficio económico se consigue con la reducción de la contaminación del aire mediante el arbolado de Euskadi? / What economic benefit is achieved by reducing air pollution through trees in the Basque Country?	144	Silvestre García de Jalón
Climate change and heatwaves in the main coastal cities of the Basque Country	164	Luis M ^a . Abadie Marek Smid
Cambio climático, riesgo de inundación y medidas de adaptación: retos en la valoración de daños y evaluación de medidas / Climate change, flood risk and adaptation measures: challenges in assessing damage and evaluating of measures	190	Pablo Martínez-Juarez Sebastien Foudi Ibon Galarraga Emilio Cerdá

¿Para qué impactos climáticos se preparan las ciudades españolas? / What climatic impacts are Spanish cities preparing for?

212

Marta Olazabal
María Ruiz de Gopegui

The impact of urban form on vehicle fuel consumption in Mexican metropolitan areas

240

David R. Heres
Rafael Dávila-Bugarín

El desarrollo sostenible en los municipios españoles: elaboración de un índice sintético (ISSDS)

Sustainable development in Spanish cities: elaboration of a synthetic index (ISSDS)

264

Álvaro de Juanes
José Miguel Giner

Presentación

Elisa Sainz de Murieta e Ibon Galarraga

7

1. Introducción

El cambio climático es uno de los mayores retos a los que se enfrentan nuestras sociedades. Muchos de los cambios previstos por la ciencia son ya evidentes y el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, en sus siglas en inglés) en su informe especial *Calentamiento global de 1,5° C* advertía de la vulnerabilidad de determinados sistemas naturales o humanos que podrían verse gravemente afectados incluso por pequeños aumentos de la temperatura media del planeta. Para evitar riesgos intolerables resulta ineludible y urgente implementar, en las próximas décadas, políticas de mitigación y adaptación (IPCC, 2018a).

Durante mucho tiempo la prioridad y los esfuerzos de la política climática se han dirigido a la reducción de emisiones. Sin embargo, ahora sabemos que la adaptación al cambio climático es también imprescindible. El mismo Acuerdo de París, aprobado en 2015 y que ha sido ratificado por 189 países, recoge en su Artículo 2 el doble objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de los 2°C (y continuar con los esfuerzos para limitar ese aumento a 1,5°C); y mejorar la resiliencia¹ y la capacidad adaptativa de nuestra sociedad para hacer frente a los impactos del cambio climático (CMNUCC, 2015). Este ha sido un cambio fundamental en las negociaciones internacionales en las que se reconoce la necesidad de abordar ambas opciones, mitigación y adaptación, conjuntamente (Magnan y Ribera, 2016).

El IPCC define la adaptación en sistemas humanos como el «proceso de ajuste al clima actual o el clima esperado y sus efectos, tratando de moderar los daños o aprovechar las oportunidades beneficiosas». En cuanto a los sistemas naturales, se refiere al «proceso de ajuste al clima actual y sus efectos; la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima esperado y a sus efectos» (IPCC, 2018b). Pero en la práctica, ¿qué es la adaptación? Las políticas y medidas de adaptación pueden ser de muy distinta naturaleza y se pueden dar a diferentes escalas temporales y espaciales; pueden materializarse a través de infraestructuras y soluciones técnicas, pero también a través de leyes, reglamentos o cambios de comportamiento. Así, es posible encontrar diversos tipos de clasificaciones que siguen criterios diferentes.

¹ El IPCC (2018b) define resiliencia como la «capacidad de los sistemas social, económico y ambiental de hacer frente a eventos, tendencias o perturbaciones peligrosas, respondiendo o reorganizándose de manera que mantienen su función, identidad y estructura esencial, a la vez que mantiene su capacidad adaptativa, de aprendizaje y de transformación».

En el Cuadro nº 1 se muestran algunos de los ejemplos más habituales. Esta es, precisamente, una de las dificultades a las que es necesario enfrentarse cuando se intenta medir el progreso en materia de adaptación: una diversidad de métodos, métricas, escalas y puntos de referencia (Ford *et al.*, 2015). Pero, tal y como mostraremos en la sección 3, además de unos retos importantes, la adaptación también presenta una serie de oportunidades para avanzar hacia una sociedad más resiliente al cambio climático, más sostenible y justa.

En Euskadi, el primer instrumento de planificación que menciona específicamente la adaptación al cambio climático entre sus objetivos es el Segundo Programa Ambiental (PMA 2007-2010), si bien la Estrategia Ambiental Vasca de Desarrollo Sostenible 2002-2020 (EAVDS) incluía en su Meta 5 «limitar la influencia en el cambio climático». La Estrategia Vasca de Cambio Climático Klima 2050 tiene dos objetivos principales: el primero la reducción de emisiones² y el segundo «asegurar la resiliencia del territorio vasco al cambio climático». La adaptación ha ido adquiriendo una importancia cada vez mayor en la política climática vasca de la mano de esta estrategia, que incluye varias metas y líneas de actuación que abordan la adaptación al cambio climático. El anteproyecto de ley de cambio climático de Euskadi también recoge entre sus objetivos la necesidad de avanzar en la adaptación al cambio climático e incorpora diversas medidas para promover que las políticas de adaptación se desplieguen de forma transversal e intersectorial.

En el contexto del Pacto Verde Europeo, la Comisión Europea acaba de anunciar una propuesta de Ley Europea del Clima, así como una nueva Estrategia Europea de Adaptación al Cambio Climático, más ambiciosa, y cuyo documento base está actualmente en exposición pública. En España, por primera vez, la adaptación ha sido incluida en el objeto del proyecto de Ley de Cambio Climático que acaba de ser remitido al Congreso de los Diputados. Este proyecto de ley destaca la importancia de la adaptación, de la necesidad de abordarla para evitar o paliar los impactos del cambio climático y subraya, además, sus beneficios tanto económicos como sociales. Igualmente, se establece el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) como el documento de referencia e instrumento de planificación básico para promover la acción en materia de adaptación.

Este monográfico recoge diferentes aspectos de la adaptación al cambio climático, tal y como explicamos en la sección 2. En la sección 3 identificamos los principales retos y oportunidades que nos plantea y en la sección 4 hacemos una breve reflexión sobre los potenciales efectos de la COVID-19 en las políticas de adaptación. Por último, en la sección 5 sugerimos algunas líneas de actuación que consideramos importantes para promover la acción en materia de adaptación.

² El primer objetivo es en realidad un doble objetivo que persigue una reducción de las emisiones de GEI de al menos un 40 % a 2030 y un 80 % a 2050 (tomando como referencia el año base 2005) y alcanzar en 2050 un consumo de energía renovable del 40 % sobre el consumo final.

Cuadro nº 1. EJEMPLOS DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN Y CRITERIOS PARA SU CLASIFICACIÓN

Criterio	Clasificación	Ejemplos
Naturaleza de los agentes involucrados	Adaptación pública o privada	- La adaptación pública tiene lugar cuando hay una intervención del gobierno para apoyar la adaptación. Por ejemplo, construcción de infraestructura o planificación territorial. - La adaptación privada ocurre cuando las medidas son implementadas por individuos o entidades privadas. Por ejemplo, los seguros contra inundaciones.
Escala espacial	Local o general	- La adaptación local se refiere a aquellas opciones o medidas implementadas a escala local (o regional), como la construcción de una determinada infraestructura de protección. - Los planes de salud que se ocupan de afecciones relacionadas con el clima son ejemplos de adaptación general.
Escala temporal	Medidas a corto o largo plazo	- Las medidas de adaptación a corto plazo son aquellas medidas urgentes para evitar o moderar los efectos del cambio y la variabilidad climática actual. Por ejemplo, un seguro agrario. - Las soluciones de adaptación a largo plazo reducen la vulnerabilidad y aumentan la resiliencia para hacer frente a los impactos esperados a largo plazo. Por ejemplo, una ordenación territorial o urbana que incorpore criterios climáticos y de resiliencia.
Tipo de medida	Infraestructura, comportamiento, institucional, financiera o informativa	- Las infraestructuras son construcciones y soluciones técnicas para hacer frente al impacto del cambio climático. Por ejemplo, diques costeros. - Las opciones de comportamiento son aquellas enfocadas en cambiar conductas o prácticas comunes, tales como prácticas o métodos agrícolas. - Las respuestas institucionales al cambio climático incluyen políticas, planes y otras medidas regulatorias. - Las opciones financieras incluyen medidas como incentivos económicos o fiscales para la adaptación. - Sistemas de información, como los sistemas de alerta temprana, proporcionan datos que permiten hacer frente a determinados impactos.
Capacidad de responder ante la incertidumbre y / o abordar otros beneficios asociados	Medidas de no arrepentimiento o bajo arrepentimiento; medidas win-win	- Las opciones sin arrepentimiento (<i>no regret</i>) son aquellas medidas que representan beneficios netos incluso en ausencia de cambio climático, como la puesta en marcha de sistemas de alerta temprana; las medidas de bajo arrepentimiento o <i>low regret</i> son aquellas que tienen costes relativamente bajos y grandes beneficios, como mejorar la eficiencia en sistemas de regadío. - Las medidas win-win o de beneficio mutuo, además de contribuir a la adaptación, también proporcionan otros beneficios sociales, económicos o ambientales. Por ejemplo, medidas de adaptación basadas en la naturaleza.

Fuente: Elaboración adaptada de Sainz de Murieta et al. (2014).

2. Contribuciones del monográfico

Este monográfico consta de diez artículos que abordan la adaptación al cambio climático desde diferentes perspectivas. **Francesco Bosello** y **Ramiro Parrado** presentan una introducción a los principales métodos para la estimación de los costes del cambio climático a través de modelos macroeconómicos. Para ello revisan diferentes enfoques metodológicos, analizan las diferencias entre ellos y comparan las principales estimaciones que proporcionan. Por su parte, **Alistair Hunt** y **Filippo Fraschini** describen el uso potencial del Análisis de Cartera para la toma de decisiones en materia de adaptación al cambio climático. Esta metodología utilizada en economía financiera está actualmente infrautilizada en contextos de cambio climático, pero su utilidad en contextos de incertidumbre presenta un potencial interesante. En el campo de las finanzas del clima, **Itziar Ruiz-Gauna**, **Ibon Galarraga** y **Patxi Greño** evalúan el impacto de la emisión de bonos sostenibles que realizó el Gobierno Vasco en 2018, tanto de los proyectos individuales como su impacto indirecto sobre la producción, la renta y el empleo de la Comunidad Autónoma del País Vasco.

El sector de la energía, tradicional y ampliamente estudiado desde una perspectiva de reducción de emisiones, no estará, sin embargo, exento de sufrir impactos como consecuencia del cambio climático. **Giuliano Girardi**, **José Carlos Romero** y **Pedro Linares** analizan los impactos directos e indirectos del cambio climático para este sector en España e incorporan recomendaciones a nivel internacional y estatal. **Silvestre García de Jalón** explora el papel que pueden jugar los ecosistemas, en este caso los bosques y el arbolado, en la reducción de contaminantes atmosféricos y estima el valor económico de este servicio ecosistémico. En relación con el cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos, **Luis María Abadie** y **Marek Smid** calculan el impacto de las olas de calor en tres capitales costeras vascas. Los autores realizan una modelización probabilística hasta el año 2100 de la frecuencia, duración e intensidad de las olas de calor considerando dos escenarios de emisión. Por su parte, **Pablo Martínez-Juarez**, **Sébastien Foudi**, **Ibon Galarraga**, **Nuria Osés-Eraso** y **Emilio Cerdá** revisan las metodologías de valoración de daños asociados a episodios de inundabilidad, así como de evaluación de medidas de adaptación a estos fenómenos.

Las ciudades están adquiriendo una gran importancia y protagonismo en la lucha contra el cambio climático. Se estima que son responsables de alrededor del 70% de las emisiones globales y a la vez concentran gran parte de la población mundial y de los activos económicos, por lo que se espera que los impactos del cambio climático puedan ocasionar daños humanos, económicos y físicos importantes (Revi *et al.*, 2014). Son, además, agentes activos en la política climática. El portal para la Acción Climática Mundial (NAZCA³) impulsada por Naciones Unidas recoge las

³ Plataforma NAZCA: <https://climateaction.unfccc.int/>

acciones de más de 10.000 ciudades que han hecho públicos sus compromisos climáticos. **Marta Olazabal** y **María Ruiz de Gopegui** analizan los impactos para los que se están preparando 11 ciudades españolas que cuentan con planes de adaptación. Las autoras identifican siete amenazas climáticas principales y estudian también de qué manera se incorporan aspectos importantes, tales como la incertidumbre o los impactos en cascada, en las evaluaciones de impactos en dichas ciudades. El planeamiento urbano es una herramienta fundamental de planificación, pero también representa un pasivo, una herencia que condiciona tanto la forma en la que podemos hacer frente a los impactos a través de las políticas de adaptación, como las emisiones de GEI asociadas a determinadas preferencias de transporte. **David R. Herres** y **Rafael Dávila-Bugarín** abordan, precisamente, la relación entre el planeamiento y el uso de diferentes modos de transporte, así como sus implicaciones en términos de contaminación y emisiones de CO₂.

El último artículo de este monográfico no analiza la adaptación al cambio climático directamente, aunque sí lo hace de manera indirecta. La adaptación está estrechamente relacionada con otros objetivos globales, como detener la pérdida de biodiversidad, la reducción del riesgo de desastres o la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. De los 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS) aprobados por todos los estados miembro de las Naciones Unidas en 2015, el número 13, está dedicado a la «Acción por el Clima» y su primera meta busca, precisamente, «fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación» ante los riesgos climáticos. En este contexto, **Álvaro de Juanes** y **José Miguel Giner** elaboran un indicador sintético para medir el progreso de 100 ciudades españolas hacia el desarrollo sostenible.

3. Retos y oportunidades de la adaptación al cambio climático

En esta sección presentamos los mensajes más importantes que se extraen de las colaboraciones de este monográfico, que complementamos con evidencias de la literatura científica en torno a la adaptación al cambio climático.

3.1. Retos de la adaptación al cambio climático

Uno de los principales retos de la adaptación, como dejan de manifiesto las contribuciones de este monográfico, es la **incertidumbre** (Bosello y Parrado). La toma de decisiones en contextos de gran incertidumbre dificulta el uso de métodos tradicionales de valoración económica, tales como el Análisis Coste Beneficio (ACB), y diversos autores han subrayado la necesidad de utilizar herramientas alternativas de evaluación (Fankhauser, 2017). Un ejemplo es la gestión adaptativa del riesgo, que consiste en definir ciclos para la monitorización, análisis, revisión y aprendizaje para la mejora continua y adaptación de las estrategias en el tiempo (Jones *et al.*, 2014 y Martínez-Juarez *et al.*). Otras herramientas económicas incluyen el análisis probabilístico del riesgo (Abadie y Smid), las opciones reales o el análisis de cartera, que detallan Hunt y Fraschini en su artículo para este monográfico.

Otro de los retos de la adaptación es que, a pesar de que algunos cambios ya son evidentes, los principales impactos van a ocurrir en un **horizonte temporal a largo plazo** (Bosello y Parrado). Esto implica la necesidad de caracterizar nuestra sociedad a futuro a través de escenarios socioeconómicos (Martínez-Juárez *et al.*) Sin embargo, el valor neto presente de los costes del cambio climático en el futuro depende, en gran medida, de las tasas de descuento utilizadas. Markanday *et al.* (2019) presentan una revisión del debate existente en relación con las tasas de descuento que deben utilizarse en contextos de cambio climático. En cualquier caso, parece razonable plantear que en proyectos a largo plazo se consideren criterios de equidad intergeneracional, de tal forma que ninguna generación prevalezca sobre las demás, lo cual implica el uso de tasas de descuento menores que las habituales o, alternativamente, tasas de descuento social que disminuyen con el tiempo (Groom, 2014).

Los impactos del cambio climático presentan importantes **efectos distributivos** (Girardi, Romero y Linares). Existen estimaciones de que el cambio climático podría reconfigurar la economía global, aunque no todos los países se verán afectados en la misma medida (Bosello y Parrado; Burke *et al.*, 2015). Mientras a nivel global los costes del cambio climático podrían alcanzar entre el 1% y el 3,3% del PIB, las pérdidas podrían ser mucho mayores en zonas de África, el Sudeste asiático o la India. No obstante, es importante comprender que los efectos distributivos no se dan solo a nivel global, sino también en nuestro contexto europeo (véase, por ejemplo, Ciscar *et al.*, 2018) donde los países del sur de Europa y aquellos grupos más vulnerables se verán afectados por el cambio climático de forma desproporcionada.

La adaptación también debe hacer frente a una serie de **barreras** o dificultades para su desarrollo efectivo (Olazabal y Ruiz de Gopegui). La literatura científica ha abordado el análisis de las barreras para la adaptación desde diferentes perspectivas y de manera prolífica durante las últimas dos décadas. Biesbroek *et al.* (2013) identifican una gran cantidad de barreras en una revisión de la literatura y las clasifican en cinco categorías: institucionales, sociales, informativas, financieras y cognitivas.

Por último, otro de los retos de la adaptación se refiere al **seguimiento y medición** de su progreso (Olazabal y Ruiz de Gopegui). Actualmente, la implementación de la adaptación muestra un despliegue relativamente pequeño y los planes existentes incorporan numerosas acciones relacionadas con la generación de conocimiento (Lesnikowski *et al.*, 2016). La adaptación presenta una serie de dificultades que no se dan en el caso de la mitigación, como la existencia de diversas definiciones y métricas para la adaptación (Ford y Berrang-Ford, 2016), además del resto de los retos mencionados en este mismo apartado.

3.2. Oportunidades de la adaptación

El objetivo principal de las políticas climáticas es la reducción de emisiones y la estabilización climática (Markandya y Rübbelke, 2004), así como aumentar la resiliencia y reducir la vulnerabilidad ante el cambio climático (Klein *et al.*, 2014), pero

muchas de estas políticas generan, además, beneficios adicionales o secundarios. La literatura muestra que los beneficios adicionales de las políticas climáticas pueden ser muy importantes cuantitativamente, pero considerar estos beneficios contribuye además a mejorar la aceptación de estas políticas (Longo *et al.*, 2012), superar el escepticismo y facilitar la acción climática (Bain *et al.*, 2016). Los co-beneficios o beneficios secundarios son a menudo ignorados, aunque en los últimos años los estudios que analizan dichos beneficios han aumentado de forma importante (Sainz de Murieta, 2019).

El ejemplo clásico de estos beneficios secundarios es la mejora de la salud como consecuencia de las políticas de reducción de emisiones, que llevan también a una menor contaminación atmosférica (Heres y Dávila-Bugarín). Sin embargo, y aunque se han estudiado en menor medida, las políticas de adaptación también ofrecen **beneficios y oportunidades adicionales**, más allá de evitar o minimizar los daños consecuencia del cambio climático (Olazabal y Ruiz de Gopegi).

Surminski y Tanner (2016) definieron el *triple dividendo de la resiliencia*. El primer dividendo se refiere a la reducción de los daños del cambio climático, el segundo dividendo trata de aprovechar el potencial económico de la adaptación y el tercero se centra en los co-beneficios económicos, sociales y ambientales.

Los **co-beneficios económicos** de la adaptación son diversos, como la reducción del riesgo de base, que puede contribuir a impulsar el emprendimiento y las inversiones y, en última instancia, el crecimiento económico. Además, la adaptación puede mejorar la capacidad de respuesta a la variabilidad climática actual sin considerar el cambio climático, es decir, reduciendo el déficit de adaptación, como veíamos anteriormente. Igualmente, representa una oportunidad económica para el desarrollo de nuevos bienes y servicios (Klein *et al.*, 2014). Ruiz-Gauna *et al.* ilustran, precisamente, cómo la inversión en bonos sostenibles ha contribuido, de forma indirecta, a la producción, la renta y el empleo en Euskadi.

En el **ámbito social**, los co-beneficios de la adaptación incluyen ejemplos relacionados con la salud humana, como políticas de salud pública y emergencias, medidas que promueven comportamientos sostenibles y saludables (Ebi *et al.*, 2013), los diversos beneficios de los espacios verdes en las áreas urbanas (Hartig *et al.*, 2014; Olazabal y Ruiz de Gopegi), o su contribución a los objetivos de desarrollo sostenible (de Juanes y Giner). Estudios recientes también abordan la importancia de la contribución de la adaptación a la construcción del capital social, mediante la creación de redes y el fortalecimiento de las interrelaciones comunitarias y sociales (Tanner *et al.*, 2016). Las medidas basadas en la naturaleza ofrecen numerosos ejemplos de los potenciales **co-beneficios ambientales** de la adaptación, como las infraestructuras verdes para la protección costera o frente a inundaciones, las opciones de gestión de cuencas para asegurar la disponibilidad de agua, o la protección y me-

jora de la biodiversidad. Estos beneficios, además, pueden cuantificarse y se puede evaluar su valor monetario, como muestra García de Jalón.

Considerar los co-beneficios de la adaptación puede ser, además, especialmente relevante si tenemos en cuenta que sus beneficios primarios (minimizar los impactos del cambio climático) a menudo solo se observan a largo plazo o en caso de que sucedan impactos, como los fenómenos meteorológicos extremos. Muchos de los co-beneficios de la adaptación, sin embargo, pueden disfrutarse a corto plazo e incluso en ausencia de cambio climático (Tanner *et al.*, 2016).

4. La adaptación en la sociedad pos-COVID-19

En el momento de escribir esta presentación, la sociedad vasca está transitando el desconfinamiento y esto puede generar unas reflexiones adicionales, puesto que una de las características que la adaptación y la situación pospandemia comparten es la incertidumbre. Es aún prematuro y quizás osado realizar análisis exhaustivos de las implicaciones que la COVID-19 puede tener en la política climática en general, y la adaptación en particular. Sin embargo, como coordinadores de este monográfico nos gustaría plantear algunas reflexiones. En primer lugar, la pandemia parece haber despertado una sensación de vulnerabilidad, tanto individual como colectiva, de nuestra sociedad en su conjunto. En este sentido sugerimos explorar estrategias que aumenten la **resiliencia** de nuestra sociedad ante diferentes situaciones (climáticas o de pandemia). En segundo lugar, esta crisis representa una **oportunidad** para que las medidas de estímulo que se aprueben estén alineadas con la respuesta climática necesaria y urgente. La organización de Naciones Unidas (2020) ha hecho un llamamiento a aprovechar esta oportunidad para «reconstruir mejor» (*build back better*) una vez superada la pandemia, tomando prestado un concepto utilizado en contextos de recuperación en situaciones posdesastre. Un estudio reciente realizado por destacados economistas como Joseph Stiglitz o Nicholas Stern, identifica una serie de políticas de estímulo verdes con el potencial de dar respuesta a la situación pospandemia y a la crisis climática, aportando además co-beneficios sociales y ambientales adicionales, que contribuyan a reducir la desigualdad. Estas políticas son: (i) inversiones en infraestructuras que ellos denominan «limpias» (refiriéndose, por ejemplo, a la apuesta por las energías renovables), (ii) impulso a la eficiencia energética en edificios; (iii) inversiones en educación y formación para dar respuesta al desempleo en línea con las necesidades de la transición hacia una economía baja en carbono, (iv) apuesta por el capital natural, para apoyar la regeneración y resiliencia de los ecosistemas y (v) apoyo a la investigación y desarrollo (Hepburn *et al.*, 2020).

5. Recomendaciones de políticas

Tal y como hemos visto, las políticas de adaptación deben hacer frente a algunos retos y al mismo tiempo representan una oportunidad para avanzar hacia sociedades más resilientes. La Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV) tiene su Es-

trategia de Cambio Climático 2050 que define como objetivos estratégicos la reducción de emisiones y el despliegue de energías renovables y garantizar la resiliencia de nuestro territorio al cambio climático (Gobierno Vasco, 2015). A continuación, se sugieren algunas actuaciones que pueden ser adicionales o complementarias a las planteadas en dicha estrategia.

a. Comprender mejor los impactos potenciales del cambio climático

Existen algunos impactos para los que aún no existe información suficiente, por ejemplo, los relacionados con los recursos hídricos, el transporte o la biodiversidad. En relación con los costes económicos, en Euskadi existen algunos estudios que abordan determinados impactos, habitualmente relacionados con eventos extremos como inundaciones (Osés-Eraso, 2009), pero sería deseable contar con una perspectiva más completa de los diversos sectores, con interrelaciones entre ellos, incluyendo estimaciones sobre la economía vasca en términos de impacto sobre el PIB o el empleo.

Por otro lado, y a medida que la temperatura global sigue aumentando, sería importante explorar el impacto de eventos catastróficos de baja probabilidad y posibles puntos de no retorno que pudieran alcanzarse, no solo climáticos (Kopp *et al.*, 2016) sino también socioeconómicos (ver, por ejemplo, van Ginkel *et al.*, 2020).

b. Identificar las oportunidades, costes y beneficios de la adaptación en Euskadi

Aunque este punto se ha abordado de forma general en esta presentación, sería importante evaluar de forma específica cómo explotar las oportunidades de la adaptación en Euskadi, así como sus co-beneficios. Existen numerosas evidencias de que a menudo los beneficios directos de la adaptación, en término de daños evitados, superan ampliamente sus costes (ver, por ejemplo, Abadie *et al.*, que incluye estimaciones para Bilbao y Donostia-San Sebastián). Conocer esta relación entre los costes y beneficios de la adaptación, incluso en contextos de incertidumbre, podría dar un impulso importante a su planificación e implementación.

El riesgo afecta y es percibido de manera diferente por diferentes actores, puesto que pueden presentar diferentes exposiciones, vulnerabilidades, actitudes y capacidades para hacer frente a los riesgos del cambio climático. Como resultado, las preferencias de riesgo dependen en gran medida de los contextos sociales, culturales y económicos. En este sentido, considerar aspectos sociales y de comportamiento es también de gran relevancia para la adaptación.

c. Identificar e implementar los instrumentos necesarios para apoyar la adaptación

En general, los gobiernos están haciendo un despliegue limitado de instrumentos para la adaptación. En una encuesta realizada a través de la red Regions4 a diversos gobiernos regionales, estos indicaron que los instrumentos más comunes en contextos de adaptación, tanto a nivel regional como estatal, fueron los programas

de cambio climático, las medidas de información y capacitación y los marcos de regulación, aunque incluso estos no existían en la mayoría de regiones (RegionsAdapt, 2019). Los planes y programas son los instrumentos más extendidos, sin embargo un estudio de 885 ciudades europeas mostró que solo el 26% disponía de un plan de adaptación, frente al 66% que contaba con planes de mitigación (Reckien *et al.*, 2018); en España solo 11 capitales de provincia cuentan con un plan de adaptación.

La aprobación del proyecto de ley de cambio climático de España puede ser un hito importante para impulsar las políticas de adaptación en el Estado, cuyo desarrollo a través del PNACC debe incluir la evaluación periódica de los impactos, vulnerabilidad y riesgos del cambio climático, la definición de indicadores y el seguimiento periódico o la necesidad de involucrar a agentes en los procesos de adaptación. La aprobación de una ley propia que dé un impulso a la adaptación en el contexto específico de Euskadi, siguiendo el ejemplo de otros gobiernos regionales como Escocia, también sería una medida importante para reforzar la implementación y puesta en marcha de la adaptación al cambio climático.

d. Establecer mecanismos de coordinación entre las políticas de adaptación y mitigación

Aunque las políticas de mitigación y adaptación son de naturaleza muy diferente y habitualmente se coordinan incluso desde departamentos distintos, es importante que se exploren las interrelaciones y sinergias entre ambas. En primer lugar, no debemos olvidar que alcanzar mayores reducciones de GEIs globalmente se traducirá en impactos menores y, por tanto, una necesidad menor de adaptación. En segundo lugar, podrían explorarse también el diseño de instrumentos que puedan favorecer la implementación de ambos tipos de políticas. Por último, los mecanismos de coordinación también podrían evitar casos de maladaptación, que son aquellas acciones definidas para reducir los impactos o la vulnerabilidad ante el cambio climático que aumenta la vulnerabilidad de otros sistemas, sectores o grupos sociales (Barnett y O'Neill, 2010). Aunque existen diferentes tipos de maladaptación, en este caso nos referimos a medidas de adaptación que generan un aumento de las emisiones. Un ejemplo clásico es el del uso de aire acondicionado para hacer frente al calor extremo.

e. Incorporar criterios distributivos, de género, equidad y justicia

Existen efectos distributivos importantes que deben tenerse en cuenta al evaluar los impactos del cambio climático. Los países empobrecidos sufrirán en mayor medida estos efectos, como también lo harán las mujeres y los colectivos más desfavorecidos y vulnerables. En cuanto a la perspectiva de género, los países miembro de la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático aprobaron en la cumbre celebrada en diciembre de 2019 en Madrid, el Plan de Acción de Género, un hito que reconoce la importancia de considerar no solo los impactos desiguales del

cambio climático sobre las mujeres y las niñas, sino también la necesidad de que la adaptación incorpore medidas para garantizar la igualdad. Aunque estos aspectos han sido recogidos en la literatura, sobre todo de impactos, en la práctica se observa que la integración en planes y programas de adaptación es aún limitada. Esta es, sin embargo, una cuestión clave para conseguir una distribución de recursos más progresiva y, en definitiva, más justa (Watkiss y Cimato, 2016).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABADIE, L.M.; SAINZ DE MURIETA, E.; GALARRAGA, I. (2020): The Costs of Sea-Level Rise: Coastal Adaptation Investments vs Inaction in Iberian Coastal Cities. *Water* 12, 1220. <https://doi.org/10.3390/w12041220>
- BAIN, P.G.; MILFONT, T.L.; KASHIMA, Y. *et al.* (2016): Co-benefits of addressing climate change can motivate action around the world. *Nat. Clim. Change* 6, 154-157. <https://doi.org/10.1038/nclimate2814>
- BARNETT, J.; O'NEILL, S. (2010): Editorial: Maladaptation. *Glob. Environ. Change* 20, 211-213. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2009.11.004>
- BIESBROEK, G.R.; KLOSTERMANN, J.E.M.; TERMEER, C.J.A.M. *et al.* (2013): On the nature of barriers to climate change adaptation. *Reg. Environ. Change* 13, 1119-1129. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0421-y>
- BURKE, M.; HSIANG, S.M.; MIGUEL, E. (2015): Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature* 527, 235-239. <https://doi.org/10.1038/nature15725>
- BURTON, I. (2004): Climate Change and the Adaptation Deficit. Environment Canada.
- CISCAR, J.C.; IBARRETA, D.; SORIA, A. *et al.* (2018): Climate impacts in Europe: Final report of the JRC PESETA III project (No. EUR 29427 EN). European Commission, Luxembourg.
- CMNUCC (2015): Acuerdo de París. Decisión CP/2015/L.9.
- EBI, K.L.; BERRY, P.; CAMPBELL-LENDRUM, CORVALAN, C. *et al.* (2013): Protecting health from climate change: vulnerability and adaptation assessment. World Health Organization, Geneva.
- FANKHAUSER, S. (2017): Adaptation to Climate Change. *Annu. Rev. Resour. Econ.* 9, 209-230. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100516-033554>
- FORD, J.D.; BERRANG-FORD, L. (2016): The 4Cs of adaptation tracking: consistency, comparability, comprehensiveness, coherency. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change* 21, 839-859. <https://doi.org/10.1007/s11027-014-9627-7>

- FORD, J.D.; BERRANG-FORD, L.; BIESBROEK, J. *et al.* (2015): Adaptation tracking for a post-2015 climate agreement. *Nat. Clim. Change* 5, 967-969. <https://doi.org/10.1038/nclimate2744>
- GOBIERNO VASCO (2015): Estrategia de Cambio Climático 2050 del País Vasco. Vitoria-Gasteiz.
- GONZALEZ-EGUINO, M., SAMPEDRO, J., GALARRAGA *et al.* (2018): La transición energética del País Vasco: Hacia un modelo sostenible Informe extraordinario de la institución del Ararteko al Parlamento Vasco). Ararteko, Vitoria-Gasteiz.
- GROOM, B. (2014): Discounting, in: Markandya, A., Galarraga, I., Sainz de Murieta, E. (Eds.), *Routledge Handbook of the Economics of Climate Change Adaptation*, Routledge International Handbooks. Routledge, Oxon (UK) and New York (USA), pp. 138-168.
- HARTIG, T.; MITCHELL, R.; DE VRIES, S. *et al.* (2014): Nature and Health. *Annu. Rev. Public Health* 35, 207-228. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-032013-182443>
- HEPBURN, C.; O'CALLAGHAN, B.; STERN, N. *et al.* (2020): Will COVID-19 fiscal recovery packages accelerate or retard progress on climate change? *Smith Sch. Work. Pap.* 20, 48.
- IPCC (2018a): Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- (2018b): Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)], in: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.O. *et al.* (Eds.), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- JONES, R.N.; PATWARDHAN, A.; COHEN, S.J. *et al.* (2014): Foundations for decision making, in: Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J. *et al.* (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, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, pp. 1-32.
- KLEIN, R.J.T.; MIDGLEY, B.L.; PRESTON, B.L. *et al.* (2014): Adaptation opportunities, constraints, and limits, in: Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J. *et al.* (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, Cambridge, pp. 899-943.
- KOPP, R.E.; SHWOM, R.L.; WAGNER, G. *et al.* (2016): Tipping elements and climate-economic shocks: Pathways toward integrated assessment. *Earths Future* 4, 2016EF000362. <https://doi.org/10.1002/2016EF000362>
- LESNIKOWSKI, A.; FORD, J.; BIESBROEK, R. *et al.* (2016): National-level progress on adaptation. *Nat. Clim. Change* 6, 261-264. <https://doi.org/10.1038/nclimate2863>
- LONGO, A.; HOYOS, D.; MARKANDYA, A. (2012): Willingness to Pay for Ancillary Benefits of Climate Change Mitigation. *Environ. Resour. Econ.* 51, 119-140. <https://doi.org/10.1007/s10640-011-9491-9>
- MAGNAN, A.K.; RIBERA, T. (2016): Global adaptation after Paris. *Science* 352, 1280-1282. <https://doi.org/10.1126/science.aaf5002>
- MARKANDYA, A.; GALARRAGA, I.; CHIABAI, A. *et al.* (2019): Determining discount rates for the evaluation of natural assets in land-use planning: An application of the Equivalency Principle. *J. Clean. Prod.* 230, 672-684. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.107>
- MARKANDYA, A.; RÜBELKE, D.T.G. (2004): Ancillary Benefits of Climate Policy / Sekundäre Nutzen der Klimapolitik. *Jahrb. Für Natl. Stat.* 224, 488-503. <https://doi.org/10.1515/jbnst-2004-0406>
- OSÉS ERASO, N. (2009): Costes del cambio climático en el País Vasco por riesgo de inundación. *Ekonómiaz* 71, 62-83.
- RECKIEN, D.; SALVIA, M.; HEIDRICH, O. *et al.* (2018): How are cities planning to respond to climate change? Assessment of local climate plans from 885 cities in the EU-28. *J. Clean.*

- Prod. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.220>
- REGIONSADAPT (2019): Climate change adaptation in a multi-level governance context: a perspective from subnational governments. *Regions*4.
- REVI, A.; SATTERTHWHITE, D.E.; ARAGÓN-DURAND, F. *et al.* (2014): Urban areas, in: Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J. *et al.* (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, Cambridge, pp. 535-612.
- SAINZ DE MURIETA, E.; GALARRAGA, I.; MARKANDYA, A. (2014): An introduction to the economics of adaptation to climate change, in: Markandya, A., Galarraga, I., Sainz de Murieta, E. (Eds.), *Routledge Handbook of the Economics of Climate Change Adaptation, Routledge International Handbooks*. Routledge, New York, pp. 3-26.
- SURMINSKI, S.; TANNER, T. (Eds.) (2016): *Realising the «Triple Dividend of Resilience.»* Springer Berlin Heidelberg, New York, NY.
- TANNER, T.; SURMINSKI, S.; WILKINSON, E. *et al.* (2016): The triple dividend of resilience: a new narrative for disaster risk management and development, in: Surminski, S., Tanner, T. (Eds.), *Realising the «Triple Dividend of Resilience.»* Springer Berlin Heidelberg, New York, NY, pp. 1-30.
- UNITED NATIONS (2020): Climate Change and COVID-19: UN urges nations to 'recover better' [WWW Document]. U. N. URL <https://www.un.org/en/un-coronavirus-communications-team/un-urges-countries-%E2%80%98build-back-better%E2%80%99> (accessed 5.11.20).
- VAN GINKEL, K.; BOTZEN, W.J.W.; HAASNOOT, M. *et al.* (2019): Climate change induced socio-economic tipping points: review and stakeholder consultation for policy relevant research. *Environ. Res. Lett.* <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6395>
- WATKISS, P.; CIMATO, F. (2016): *The Economics of Adaptation and Climate-Resilient Development: Lessons from Projects for Key Adaptation Challenges* (Working Paper No. 235). Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London.

Aurkezpena

Elisa Sainz de Murieta eta Ibon Galarraga

1. Sarrera

Gure gizartearen erronka handienetako bat da klima-aldaketa. Agerikoak dira, jadanik, zientziak aurreikusitako aldaketetako asko eta Klima Aldaketari buruzko Gobernu Arteko Taldeak (IPCC, ingelesez) *1,5°C-ko berotze globala* izeneko txosten berezian zenbait sistema naturalen eta giza sistemaren kalteberatasunaz ohartzen zuen, zeinak planetaren batez besteko tenperatura igoera txikiek ere larriki eragin baitiezaiekete. Arrisku onartezinak saihesteko ezinbestekoa eta urgentziazkoa da arintze- eta egokitze-politikak ezartzea hurrengo hamarkadetan (IPCC, 2018a).

Luzaroan, klima-politikaren lehentasuna eta ahaleginak isuriak murriztera bideratu dira. Hala ere, orain ere badakigu ezinbestekoa dela klima-aldaketa egokitzea. Pariseko Akordioak berak, 2015ean onartu eta 189 herrialdek berretsi dutena, 2. artikuluan, berotegi-efektuko gasen isurtzeak (BEG) murrizteko helburu bikoitza jasotzen du munduko batez besteko tenperaturaren igoera 2°C azpitik mantentzeko (eta ahaleginak egitea igoera hori 1,5°C-ra mugatzeko); eta gure gizartearen erresilientzia¹ eta egokitzeko gaitasuna hobetzea klima-aldaketa inaktuei aurre egiteko (CMNUCC, 2015). Funtsezko aldaketa izan da hori nazioarteko negoziazioetan, ezinbestekotzat jo baita bi aukerak –arintzea eta egokitzea– batera jorratzea (Maggan eta Ribera, 2016).

IPCCk honela definitzen du giza sistemen egokitzapena: *«egungo klimari edo espero den klimari eta haren ondorioei doitzeko prozesua, kalteak leuntzen eta aukera onuragarriak baliatzen saiatuz»*. Sistema naturalei dagokienez, *«egungo klimari eta ondorioei doitzeko prozesua; gizakiaren esku-hartzeak erraz dezake espero den klimari eta ondorioei doitzen»* (IPCC, 2018b). Baina, praktikan, zer da egokitzapena? Egokitzeko politikak eta neurriak oso desberdinak izan daitezke eta denbora-eta espazio-eskala desberdinetan gerta daitezke; azpiegituren eta irtenbide tekniko bidez gauza daitezke, baita lege, erregelamendu edo jokabide-aldaketen bidez ere.

¹ IPCCk (2018b) honela definitzen du erresilientzia: «sistema sozialen, ekonomikoen eta ingurumen-sistemen gaitasuna gertakari, joera edo asaldura arriskutsuei aurre egiteko, funtzioa, identitatea eta funtsezko egitura mantenduz erantzunda edo berrantolatuta, egokitzeko, ikasteko eta eraldatzeko gaitasuna mantentzen duen bitartean».

Horrela, irizpide desberdinak jarraitzen dituzten hainbat sailkapen mota aurki daitezke, 1. taulan adibide ohikoenak erakusten dira. Hain zuzen, hura da aurre egin behar zaion zailtasunetako bat egokitzapenaren arloan aurrerapena neurtu nahi denean: metodo, metrika, eskala eta erreferentziazko puntu asko (Ford *et al.*, 2015). Hala ere, hirugarren atalean erakutsiko dugun bezala, erronka inportantez gain, egokitzapenak hainbat aukera ere eskaintzen ditu klima-aldaketaaren aurrean gizarte indartsuago baterantz aurre egiteko, jasangarriagoa eta justuagoa.

Euskal Autonomia Erkidegoan (EAE), klima-aldaketarako egokitzapena berariaz bere helburuen artean jasotzen duen lehen planifikazio-tresna Bigarren Ingurumen Programa (Ingurumeneko Esparru Programa 2007-2010) da, nahiz eta Garapen Jasangarriaren Euskal Ingurumen Estrategia 2002-2020 delakoak ere bere 5. helmugan jasotzen zuen «klima-aldaketaaren eragina mugatzea». Klima Aldaketaaren Euskadiko Estrategiak (Klima 2050) bi helburu nagusi dauzka: lehena, emisioak murriztea² eta, bigarrena, «euskal lurraldearen erresilientzia bermatzea klima-aldaketa-erikiko». Egokitzapen horrek geroz eta garrantzi handiagoa hartu du EAEko politika klimatikoan, estrategia honen eskutik. Bertan, izan ere, hainbat xede eta jarduera-lerro aurreikusten dira, klima-aldaketarako egokitzapena jorratzen dutenak. Klima-aldaketa-erikiko buruzko (EAE) Legearen aurreproiektuak ere bere helburuen artean jasotzen du klima-aldaketa-erikiko egokitzapenean aurrera egiteko beharrezana, eta hainbat neurri jasotzen ditu, egokitzapen-politikak zeharka eta sektore artean hedatu daitezela sustatzeko.

Europako Itun Berdearen testuinguruan, Europako Batzordeak Klimaren Europako Legearen proposamea iragarri berri du, baita Klima Aldaketara Egokitzeko Europako Estrategia berri bat ere, asmo handiagokoa, eta gaur egun jendaurrean dagoena. Espainian, lehen aldiz, egokitzapena jaso da Diputatuen Kongresura bidali berri den Klima Aldaketaaren Legearen proiektuaren xedean. Lege-proiektu horrek berariaz azpimarratzen du egokitzapenaren garrantzia, bai eta klima-aldaketaaren eraginak saihestu edo arintzeko egokitzapen hori jorratzeko beharrezana ere. Gainera, bere ondorio ekonomiko eta sozialak nabarmentzen ditu. Era berean, Klima Aldaketara Egokitzeko Plan Nazionala ezartzen da egokitzapenaren arloan ekintza sustatzeko oinarritzko plangintza-tresna eta erreferentziazko agiri gisa.

Monografiko honek klima-aldaketarako egokitzapenaren hainbat alderdi jaso ditu, 2. atalean azaldu dugun bezala. 3. atalean, planteatzen dizkigun aukera eta erronka nagusiak identifikatu ditugu, eta, bestetik, 4. atalean hausnarketa txiki bat egin dugu, COVID-19ak egokitzapen-politikan izan ditzakeen eraginaren gainean. Azkenik, 5. atalean, egokitzapenaren arloan ekintza sustatzeko garrantzitsutzat jotzen ditugun jarduera-lerro batzuk iradoki ditugu.

² Lehen helburua, berez, helburu bikoitza da; berotegi-efektuko gasak 2030erako gutxienez % 40 eta 2050erako gutxienez % 80 murriztea (2005 urteko datua hartuta oinarritzat); eta 2050ean energia beriztagarriaren kontsumoa % 40koa izan dadila lortzea azken kontsumoaren gainean.

1. Taula. **EGOKITZEKO NEURRIEN ADIBIDEAK ETA SAILKATZEKO IRIZPIDEAK**

Irizpidea	Sailkapena	Adibideak
Tartean sartutako eragileen izaera	Egokitzapen publikoa edo pribatua	- Egokitzapenari laguntzeko gobernuaren esku-hartzea dagoenean gertatzen da egokitzapen publikoa. Adibidez, azpiegiturak eraikitzea edo lurralde-plangintza egitea. - Egokitzapen pribatua gertatzen da pertsonak edo erakunde pribatuak neurriak inplementatzen dituztenean. Adibidez, uholdeen kontrako aseguruak.
Espazio eskala	Tokikoa edo orokorra	- Tokiko egokitzapena tokiko eskalan (edo eskualdekoan) ezarritako aukerei edo neurriei buruzkoa da, hala nola babes-azpiegitura zehatz bat eraikitzea. - Egokitzapen orokorreko adibideak dira klimarekin lotutako afekzioez arduratzen diren osasun-planak.
Denbora-eskala	Neurriak epe laburrera edo luzera	- Epe laburrerako egokitzapen-neurriak urgentziazko neurriak dira egungo aldaketaren eta aldakortasun klimatikoaren efektuak saihesteko edo leuntzeko. Adibidez, nekazaritzako aseguruak. - Epe laburrerako egokitzapen-irtenbideak kalteberatasuna murrizten dute eta erresilientzia handitzen dute epe luzera espero daitezkeen inpaktuei aurre egiteko. Adibidez, lurraldearen edo hiriaren antolaketa, klimarekin eta erresilientziarekin lotutako irizpideak jasotzen dituena.
Neurri mota	Azpiegitura, portaera, instituzionala, finantzarioa edo informatiboa	- Azpiegiturak klima-aldaketaren inpaktuei aurre egiteko eraikuntza eta irtenbide teknikoak dira. - Portaerak edo praktika komunak aldatzera fokuratuta daudenak dira portaera-aukerak, hala nola nekazaritzako praktikak edo metodoak. - Klima-aldaketari emandako erantzun instituzionalek politikak, planak eta bestelako neurri erregulatzaileak hartzen dituzte. - Aukera finantzarioek egokitzapenerako pizgarri ekonomikoak edo fiskalak bezalako neurriak hartzen dituzte. - Informazio-sistemek, alerta goiztiarreko sistemak kasu, inpaktu zehatz batzuei aurre egiten uzten dieten datuak ematen dituzte.
Ziurgabetasunari erantzuteko eta/edo lotutako beste onura batzuei heltzeko gaitasuna.	Damurik ezeko edo damurik baxuko neurriak; win-win neurriak	- Damurik gabeko aukerak (<i>no regret</i>) onura garbiak dakartzatenak dira, baita klima-aldaketarik ez dagoenean ere, besteak beste alerta goiztiarren sistemak martxan jartzea; damurik baxuko neurriak edo <i>low regret</i>, berriz, kostu baxu samarrak eta onura handiak dituztenak dira, hala nola ureztatze-sistemen eraginkortasuna hobetzea. - Elkarren onurako edo win-win neurriek, egokitzapenari laguntzeaz gain, beste onura sozial, ekonomiko edo ingurumeneko batzuk ere dakartzate. Adibidez, naturan oinarritutako egokitzapen-neurriak.

Iturria: Sainz de Murieta-rengandik eta beste batzuegandik egokituta (2014).

2. Monografikoaren ekarpenak

Monografiko honek hamar artikulua ditu eta klima-aldaketatara egokitzea aztertzen du hainbat ikuspegitatik.

Francesco Bosello eta **Ramiro Parrado** jaunek sarrera egiten diete klima-aldaketa-aren kostuak zenbatesteko metodo nagusiei modelo makroekonomikoen bidez. Horretarako, ikuspegi metodologiko desberdinak berraztertzen dituzte, haien arteko desberdintasunak aztertzen dituzte eta ematen dituzten zenbatespen nagusiak alderatzen dituzte. Beste aldetik, **Alistair Hunt** eta **Filippo Franchini** jaunek Zorroaren Azterketaren erabilera potentziala deskribatzen dute erabakiak hartzeko klima-aldaketatara egokitzeko arloan. Finantza-ekonomian erabilitako metodologia hori erabat gutxietsita dago klima-aldaketa-aren testuinguruetan; baina, ziurgabetasun-testuinguruetan erabiltzeak potentzial interesgarria adierazten du.

Klimaren finantzen eremuan, **Itziar Ruiz-Gaunak**, **Ibon Galarragak** eta **Patxi Greñok** ebaluatzen dute Eusko Jaurlaritzak 2018an egindako bonu jasagarrien jaulkipenaren inpaktua, bai banakako proiektuen inpaktua bai EAEko ustiapen, errenta eta enpleguaren gaineko zeharkako inpaktua.

Hala ere, energia-sektorea, tradizionala eta isurtzeak murrizteko ikuspegitik zabal aztertu dena, ez da salbuetsita egongo klima-aldaketa-aren ondoriozko inpaktuak jasatetik. **Giuliano Girardi**, **Jose Carlos Romero** eta **Pedro Linares** jaunek klima-aldaketa-aren zuzeneko eta zeharkako inpaktuak aztertzen dituzte Espainiako sektore horretan eta, nazioarteko eta estatuko gomendioak gehitzen dituzte sektore horrentzat. **Silvestre García de Jalón** jaunak aztertzen du ekosistemek eduki dezaketen zeregina airearen kutsatzaileak murrizten, kasu honetan basoek eta zuhaitzek, eta ekosistema-zerbitzu horren balio ekonomikoa estimatzen du.

Klima-aldaketa-ri eta muturreko fenomeno meteorologikoei dagokienez, **Luis Ma Abadie** eta **Marek Smid** jaunek bero-boladen inpaktua kalkulatzeko euskal kostaldeko hiru hiritan. Egileek bero-boladen maiztasunaren, iraupenaren eta intentsitatearen 2100erainoko probabilitate-modelizazio bat egiten dute eta isuri-ri-ri bi agerleku hartzen dituzte aintzat. Bestalde, **Pablo Martinez-Juarez**, **Sébastien Foudi**, **Ibon Galarraga**, **Nuria Osés-Eraso** eta **Emilio Cerdá** egileek berraztertzen dituzte uholde-arrisku-ari lotutako kalteak balioesteko eta fenomeno horiei egokitzeko neurriak ebaluatze-ko metodologiak.

Klima-aldaketa-aren aurkako borrokan, hiriak garrantzi eta protagonismo handia ari dira hartzen. Uste da munduko isuri-ri % 70eko inguru-aren arduradunak direla eta, era berean, munduko populazio-aren eta aktibo ekonomiko-ri zati gehiena baten dutela; horregatik, espero da klima-aldaketa-aren inpaktuek giza kalte, kalte ekonomiko eta fisiko handiak sortu ahal izatea (Revi *et al.*, 2014). Gainera, eragile akti-

boak dira klimaren politikan. Munduko Ekintza Klimatikorako atariak (NAZCA³), Nazio Batuak bultzatuta, klima-konpromisoak argitaratu dituzten 10.000 baino hiri gehiagoren ekintzak jasotzen ditu. **Marta Olazabal** eta **María Ruiz de Gopegui** andreak aztertzen dituzte inpaktuak eta horiei aurre egiteko egokitzapen-planak dituzten Espainiako 11 hiri prestatzen ari direnak. Egileek, nagusiki, zazpi mehatxu klimatiko identifikatzen dituzte eta, era berean, aztertzen dute nola txertatzen diren alderdi inportanteak, hala nola ziurgabetasuna edo mailatutako inpaktuak, aipatutako hirien inpaktu-ebaluazioetan. Hiri-plangintza funtsezko plangin-tza-tresna bat da, baina pasibo bat ere bada, jaraunspen bat zeinak aurre egiteko modua baldintzatzen duen bai inpaktuei egokitzapen-politiken bidez bai berotegi-efektuko gasen isuriei (BEG) garraio-lehentasan jakin batzuen bidez.

David Heres eta **Rafael Dávila-Bugarín** egileek heltzen diote, bereziki, plangintzaren eta garraio-mota desberdinak erabiltzearen arteko erlazioari, baita haien inplikazioak ere kutsaduraren eta CO₂ isurketen terminoetan.

Monografiko honen azken artikulua ez du zuzenean aztertzen egokitzapena klima-aldaketara, zeharka egiten badu ere. Egokitzapenak lotura estua du beste helburu global batzuekin, hala nola biodibertsitatearen galera geldiaraztea, hondamendi-arriskua murriztea edo Garapen Jasangarrirako 2030 Agenda. Nazio Batuetako estatu kide guztiek 2015ean onartutako 17 garapen jasangarriko helburu horietatik (GJH), 13.a «Klimaren aldeko ekintzari» buruzkoa da eta lehen jomugak, bereziki, erresilientzia eta egokitzeko gaitasuna sendotzea bilatzen du klima-arriskuen aurrean. Testuinguru horretan, **Álvaro de Juanes** eta **Jose Miguel Giner** egileek adierazle sintetiko bat landu dute Espainiako 100 hiriren aurrerapena neurtzeko garapen jasangarrirantz.

3. Monografikoaren lankidetzaz-ideia garrantzitsuenak hautatzea

Atal honetan, monografiko honen kolaborazioetatik atera diren mezurik garrantzitsuenak aurkeztu ditugu, klima-aldaketarako egokitzapenaren gaineko literatura zientifikoko ebidentziekin osatuta.

3.1. *Klima-aldaketara egokitzeko erronkak*

Klima-aldaketara egokitzeko erronka nagusietako bat **ziurgabetasuna** da, monografiko honen ekarpenek agerian uzten dutenez (Bosello eta Parrado). Ziurgabetasun handiko testuinguruetan erabakiak hartzeak balioespen ekonomikoaren ohiko metodoen erabilera zailtzen du, hala nola Kostua/Onura Azterketa eta hainbat egilek azpimarratu dute ebaluatzeko beste tresna batzuk erabiltzeko beharra (Fankhauser, 2017). Arriskuaren egokitze-kudeaketa da horren adibidea, zeina zikloak definitzean datza monitorizazio, azterketa, berrikuspen eta ikaskuntzarako, etengabe hobetzeko

³ NAZCA plataforma: <https://climateaction.unfccc.int/>

eta estrategiak egokitzeko denboran (Jones *et al.*, 2014 eta Martinez-Juarez *et al.*). Beste tresna ekonomiko batzuek benetako aukerak jasotzen dituzte (Abadie *et al.*, 2017), edo zorroaren azterketa, zeina Hunt eta Fraschini egileek zehazten duten monografiko honetarako egindako artikuluan.

Egokitzapenaren beste erronka bat da **epe luzerako denbora-horizonte** batean gertatuko direla inpaktu nagusiak, aldaketa batzuk dagoeneko nabariak badira ere (Bosello eta Parrado). Horrek dakar etorkizunean gure gizartea ezaugarritzeko beharra agertoki sozioekonomikoen bidez (Martinez-Juarez *et al.*). Hala ere, klima-aldaketaren kostuen egungo balio garbia, neurri handi batean, erabilitako deskontutasen mende egongo da etorkizunean. Markanday-k *eta beste batzuek* (2019) aurkezten dute dagoen eztabaidaren azterketa, klima-aldaketaren testuinguruetan erabili behar diren deskontu-tasei buruz. Edonola ere, arrazoizkoa dirudi planteatzea belaunaldien arteko ekitate-irizpidetzat hartzea epe luzerako proiektuetan; hau da, ez da belaunaldirik nagusituko besteen gainean, zeinak ohikoak baino deskontutasa txikiagoen erabilera inplikatzan duen edo, txandaka, denborarekin txikitzen doazen deskontu-tasa sozialak (Groom, 2014).

Klima-aldaketaren inpaktuek **banatze-efektu** inportanteak agertzen dituzte (Girardi, Romero eta Linares). Hainbat estimazioen arabera, klima-aldaketak munduko ekonomia birkonfigura lezake, nahiz eta neurri berean ez eragin herrialde guztiei (Bosello eta Parrado; Burke *et al.*, 2015). Klima-aldaketaren kostuak munduan BPGd-aren % 1aren eta % 3,3ren artekoa izan badaiteke ere, galerak askoz handiagoak izan litezke Afrikako, Hego-ekialdeko Asiako edo Indiako zonetan. Hala ere, garrantzitsua da ulertzea banatze-efektuak ez direla gertatzen soilik munduan, Europako testuinguruan ere bai (ikus, adibidez, Ciscar *et al.*, 2018), non klima-aldaketak Europa hegoaldeko herrialdeak eta kalteberagoak diren taldeak ukituko dituen era neurrigabeen.

Egokitzapenak hainbat **hesiri** edo zailtasunei ere egin behar die aurre benetan garatzeko Olazabal eta Ruiz de Gopegui). Literatura zientifikoak, azken bi hamarkadetan, egokitzeko hesiak aztertzeari heldu dio hainbat ikuspegitatik eta emankortasunez. Biesbroek-ek *eta beste egile batzuek* (2013) hesi asko identifikatzen dituzte literatura aztertzean eta bost kategoriatan sailkatzen dituzte: instituzionalak, sozialak, informatiboak, finantzarioak eta kognitiboak.

Azkenik, aurrerapenaren **jarraipenari eta neurketari** buruzkoa da egokitzapenaren beste erronka bat (Olazabal eta Ruiz de Gopegui). Gaur egun, egokitzapenaren inplementazioak hedapen txiki samarra erakusten du. Egokitzapen-planek ezagutza sortzearekin lotutako ekintza asko txertatzen dituzte (Lesnikowski *et al.*, 2016). Egokitzapenak hainbat zailtasun ditu, zeinak ez baitira gertatzen arintze kasuetan, hala nola egokitzapenerako definizio eta neurketa asko egotea (Ford eta Berrang-Ford, 2016), apartatu honetan bertan aipatutako gainerako erronkez gain.

3.2. Egokitzapenaren aukerak

Klima-politiken lehenetasun nagusien artean, isuriak murriztea eta klima-egonkortzea daude (Markandya eta Rübbelke, 2004), baita klima-aldaketaren aurrean erresilientzia handitzea eta kalteberatasuna murriztea (Klein *et al.*, 2014); baina, politika horietako askok, gainera, onura osagarriak edo bigarren mailakoak sortzen ditu. Literaturak erakusten du klima-politiken onura osagarriak oso garrantzitsuak izan daitezkeela kantitateari dagokionez; baina, onura horiek kontuan hartzeak laguntzen du, gainera, politika horiek onartzen (Longo *et al.*, 2012), eszeptizismoa gainditzeko eta ekintza klimatikoa errazten (Bain *et al.*, 2016). Askotan baztertzen dira elkarren arteko onurak edo bigarren mailako onurak, nahiz eta 2015etik onura horiek aztertzen dituzten azterlanak esponentzialki handitu diren (Sainz de Murieta, 2019).

Bigarren mailako onura horien adibide klasikoa osasunaren hobekuntza da isuriak murrizteko politiken ondorioz, zeinek, era berean, atmosferaren kutsadura txikiagoa baitakarte (Heres y Dávila-Bugarín). Hala ere, eta gutxiago aztertu badira ere, egokitze-politikek **onura** eta **aukera osagarriak** ere eskaintzen dituzte, klima-aldaketaren ondoriozko kalteak saihesteaz edo txikiagotzeaz harago (Olazabal y Ruiz de Gopegui).

Surminski-k eta Tanner-rek (2016) *erresilientziaren dibidendu hirukoitza* definitu zuten. Lehen dibidendua klima-aldaketaren murriztapena da, bigarren dibidenduak aprobe txatu nahi ditu egokitzapenaren potentzial ekonomikoa eta, hirugarrenak elkarren arteko onura ekonomikoak, sozialak eta ingurumenekoak ditu ardatz.

Asko dira egokitzapenak dituen **elkarren arteko onura ekonomikoak**, besteak beste, oinarri-arriskua murriztea, zeinak ekintzailtza eta inbertsioak sustatzen lagun baitezake eta, azken batean, hazkunde ekonomikoa ere bai. Gainera, egungo klima-aldakortasunari erantzuteko gaitasuna hobetu dezake egokitzapenak, klima-aldaketa kontuan hartu gabe, hau da, egokitzapen-defizita murriztuz, lehen ikusten genuen bezala. Halaber, aukera ekonomikoa da ondasun eta zerbitzu berriak garatzeko (Klein *et al.*, 2014); (Ruiz-Gauna *et al.*).

Gizartearen eremuan, egokitzapenak dituen elkarren arteko onurek giza osasunarekin lotutako adibideak jasotzen dituzte, hala nola osasun publiko eta larrialdietako politikak, jokabide jasagarriak (de Juanes y Giner) eta osasuntsuak sustatzen dituzten neurriak (Ebi *et al.*, 2013) edo hiri-barrutien gune berdeen onura desberdinak (Hartig *et al.*, 2014) (Olazabal y Ruiz de Gopegui). Azterlan berriek kapital soziala eraikitzeko egokitzapenak duen ekarpenaren garrantzia ere aztertzen dute, sareak sortuz eta elkarren arteko harreman sozialak eta komunitarioak sendotuz (Tanner *et al.*, 2016). Naturan oinarritutako neurriek egokitzapenaren **ingurumeneko elkarren arteko onuren** balizko adibide asko eskaintzen dituzte, hala nola azpiegitura berdeak kostaldea edo uholdeen aurrean babesteko, arroak kudeatzeko aukerak uraren erabilgarritasuna ziurtatzeko, edo biodibertsitatearen babesa eta hobekuntza. Onura horiek, gainera, kuantifikatu egin daitezke, eta haien balio monetarioa ebaluatu (García de Jalón).

Kontuan hartzea egokitzapenaren ingurumeneko elkarren arteko onurak, gainera, bereziki garrantzitsua izan daiteke, aintzat hartzen badugu askotan epe luzera baino ez direla ikusten haren onura primarioak (klima-aldaketaren inpaktuak gutxiagotzea) edo, probabilitate izaerako inpaktuak gertatuz gero, hala nola muturreko fenomeno meteorologikoak. Egokitzapenaren elkarren arteko onura asko, halere, epe laburrera baliatu daitezke, baita klima-aldaketarik ez dagoenean ere (Tanner *et al.*, 2016).

4. COVID-aren ondorengo gizartearen egokitzapena

Aurkezpen hau idazteko momentuan, euskal gizartea deskonfinamendura igarotzen ari da eta horrek gogoeta osagarri batzuk sor ditzake, ziurgabetasuna baita egokitzapenaren eta pandemia ondorengo egoerak partekatzen duen ezaugarrietako bat. Oraindik, goiz da eta, agian, ausarta da COVID-19aren inplikazioen azterketa zehatzak egitea klima-politikan oro har, eta egokitzapenean bereziki. Hala ere, monografiko honen koordinatzaileak garen heinean, gogoeta batzuk planteatu nahi genituzke. Lehenik, badirudi pandemiak gure gizartearen kalteberatasun-sentsazio bat piztu duela orokorrean, indibiduala zein kolektiboa. Ildo horretatik, egoera desberdinen aurrean gure gizartearen **erresilientzia** handitzen duten estrategiak aztertzea iradokitzen dugu (klimak edo pandemiak eraginda). Bigarrenik, **aukera** bat da krisi hau, onartuko diren estimulu-neurriak lerrokatuta egon daitezen beharrezko eta urgentziatzko erantzun klimatikoarekin. Nazio Batuak (2020) deia egin du «hobeto eraikitzeko» (*build back better*) aukera hori aprobetxatzeko, pandemia-egoera gainditu eta gero, maileguan hartuz hondamendi ondorengo egoeretan erabilitako kontzeptua. Joseph Stiglitz edo Nicholas Stern bezalako ekonomialari nabarmenek berriki egindako ikerlan batek estimulu berdeko zenbait politika identifikatzen du ahalmena dutenak pandemia-ondorengo egoerari eta krisi klimatikoari erantzuteko, zeinek, gainera, elkarren arteko onura sozial eta ingurumeneko osagarriak ekarriko dituzten, desberdintasunak murrizten laguntzeko. Hauek dira politikak: (i) «Garbiak» izeneko azpiegiturretan egindako inbertsioak (adibidez, energia berriztagarrien aldeko apustua); (ii) eraikinetako energia-eraginkortasuna sustatzea; (iii) inbertsioak hezkuntzan eta prestakuntzan langabeziari erantzuteko, karbono-isuri baxuko ekonomia baterantz aldatzeko behararen ildotik; (iv) kapital naturalaren aldeko apustua, ekosistemen berritzeari eta erresilientziari laguntzeko; (v) ikerketari eta garapenari laguntza ematea (Hepburn *et al.*, 2020).

5. Politika-gomendioak

Ikusi dugun bezala, egokitze-politikek erronka batzuei egin behar diete aurre eta, era berean, aukera bat erakusten dute gizarte indartsuagoetara aurrera egiteko. EAEk (EAE) Klima Aldaketaren 2050erako Estrategia du, zeinak helburu estrategikotzat hartzen dituen isuriak murriztea, energia berriztagarriak hedatzea eta gure lurraldearen erresilientzia bermatzea klima-aldaketaren aurrean (Eusko Jaurlaritz, 2015). Jarraian, zenbait jarduketa iradokitzen dira, Klima Aldaketaren 2050erako Estrategian azaldutakoen gehigarriak edo osagarriak izan daitezkeenak.

a. Hobeto ulertzea klima-aldaketaren inpaktu potentzialak

Zenbait inpakturi buruzko informazio nahikorik ez dago oraindik, adibidez, hauekin lotutakoei buruz: ur-baliabideak, garraioa edo biodibertsitatea. Kontu ekonomikoei dagokienez, azterlan batzuk daude Euskadin zenbait inpakturi buruz, muturreko gertakariekin lotu ohi direnak, hala nola uholdeak (Osés-Eraso, 2009); baina, komeni litzateke edukitzea sektore guztien ikuspegi osoago bat, haien arteko harremanak, euskal ekonomiari buruzko zenbatespenak barne hartuta BPGd-aren edo enpleguaren gaineko inpaktuaren terminoetan.

Bestalde, eta temperatura globala igotzen doan heinean, garrantzitsua litzateke probabilitate txikiko hondamendi-gertaeren inpaktua eta EAERI eragin diezaioketen balizko itzultze-puntuak aztertzea, klimatikoez gain (Kopp *et al.*, 2016) sozioekonomikoak ere bai (ikus, adibidez, van Ginkel *et al.*, 2019).

b. Identifikatzea Euskadiko egokitzapenaren aukerak, kostuak eta onurak

Puntu hau orokorrean aztertu bada ere aurkezpen honetan, garrantzitsua litzateke berariaz ebaluatzea nola ustiari Euskadin egokitzapenaren aukerak, baita elkarren arteko onurak ere. Ebidentzia asko daude non egokitzapenaren onura zuzenak, askotan, nabarmen gaintzen dituzten kostuak, saihestutako kalteen terminoetan (ikus, adibidez, Abadie *et al.*, zeinak estimazioak sartzen dituen Bilbo eta Donostiako). Kostuen eta onuren arteko erlazio hori ezagutzea, baita ziurgabetasun-testuinguruetan ere, bulkada handia eman ahalko dio egokitzapenari plangintzan eta inplementazioan.

Arriskuak modu desberdinean eragiten du eta eragile desberdinek ere hala jasotzen dute hura; izan ere, esposizio, kalteberatasun, jarrera eta gaitasun desberdinak azter ditzakete klima-aldaketaren arriskuei aurre egiteko. Horren ondorioz, arriskuaren lehentasunak testuinguru sozialen, kulturalen eta ekonomikoen mende daude neurri handi batean. Ildo horretatik, alderdi sozialak eta portaera-alderdiak kon-tuan hartzea ere mesede handia egiten dio egokitzapenari.

c. Beharrezkoak diren tresnak identifikatzea eta inplementatzea egokitzapenari laguntza emateko

Oro har, gobernuak egokitzapenerako tresnen hedapen mugatua egiten ari dira. Regions4 sarearen bidez eskualdeetako hainbat gobernuri egindako inkesta batean, hauek adierazi zituzten egokitzapen-testuinguruetako tresna ohikoenak, eskualdean zein estatuan: klima-aldaketaren programak; informazio eta gaikuntza neurriak; eta erregulazio-markoak, nahiz eta horiek oraindik ere ez egon eskualde gehienetan (RegionsAdapt, 2019). Tresnarik zabalduenak planak eta programak dira; hala ere, Europako 885 hiriren azterlan batek erakutsi zuen % 26k zeukala soilik egokitzapen-plana, arintze-planak zituzten % 66ren aurrean (Reckien *et al.*, 2018). Espainian, probintziako 11 hiriburuk bakarrik dute egokitzapen-plan bat (Sainz de Murieta *et al.*, 2020).

Espainiako klima-aldaketaren legearen proiektua onartzea une garrantzitsua izan daiteke Estatuan egokitzapen-politikak sustatzeko orduan. Horiek Klima Aldaketara Egokitzeko Plan Nazionalaren bidez garatzean, berariaz ebaluatu behar dira, aldian-aldian, klima-aldaketaren eraginak, zaurgarritasuna eta arriskuak; adierazleak eta aldizkako jarraipena zehaztu behar dira; edo egokitzapen-prozesuetan agenteak sartzeko beharrezana adierazi behar da. EAEko testuinguru espezifikoan egokitzapena sustatuko duen lege bat onartzen bada, beste eskualde-gobernu batzuen adibideari jarraikiz (Eskozia kasu), aurrera pausu garrantzitsu bat emango da klima-aldaketarako egokitzapena ezarri eta martxan jartzeko neurriak indartzeko orduan.

d. Koordinazio-mekanismoak ezartzea egokitzapen- eta arintze-politiken artean

Arintze- eta egokitze-politikak askotarikoak badira ere eta sail desberdinetatik ere koordinatu ohi badira ere, garrantzitsua da bien arteko harremanak eta sinergiak aztertzea. Lehenik, ezin dugu ahaztu BEG murrizketa gehiago lortzea munduan inpaktu txikiagoak ekarriko dituztela eta, hortaz, egokitzeko behar txikiagoa ere bai. Bigarrenik, bi politika moten inplementazioa ahalbidetzeko tresnen diseinua ere azter litzateke. Amaitzeko, koordinazio-mekanismoek egokitzapen okerreko kasuak ere saihestu ahalko lituzkete, hain zuzen, klima-aldaketaren aurrean inpaktuak edo kalteberatasuna murrizteko definitutako ekintzak dira, baina beste sistema, sektore edo gizatalde batzuen kalteberatasuna handitzen dute (Barnett eta O'Neill, 2010). Egokitzapen okerreko kasu desberdinak badaude ere, isuri gehiago sortzen dituzten egokitzapen-neurriez ari gara kasu honetan. Egin ohi den adibide klasikoa aire girotuaren erabilera da muturreko beroari aurre egiteko.

e. Banatze-, genero-, ekitate eta justiziako irizpideak sartzea

Banatze-efektu inportanteak daude eta kontuan hartu behar dira klima-aldaketaren inpaktuak ebaluatzean. Herrialde pobreek neurri handiago batean jasango dituzte efektu horiek, emakumeek eta kaltetuenak eta ahulenak diren gizataldeek bezala. Genero-ikuspegiari dagokionez, Klima Aldaketaren inguruko Nazio Batuen Esparru Hitzarmeneko Alderdien Biltzarreko herrialde kideek Generoaren Ekintza Plana onartu zuten 2019ko abenduan Madrilen egindako goi-bileran, zeinak garrantzia aitortzen dion emakume eta nesken gainean klima-aldaketaren inpaktu desberdinak kontuan hartzeari, eta horrez gain, egokitzapenak berdintasuna bermatzeko neurriak ere sartzeari. Alderdi horiek literaturan jaso badira ere, batez ere, inpaktuak, praktikan ikusten da oso mugatua dela egokitzapen-planetan eta programetan sartzea. Hala ere, auzi nagusia da hori baliabideen banatze aurrerakorrago bat lortzeko eta, azken batean, justuagoa. (Watkiss eta Cimoto, 2016).

- ABADIE, L.M.; SAINZ DE MURIETA, E.; GALARRAGA, I. (2020): The Costs of Sea-Level Rise: Coastal Adaptation Investments vs Inaction in Iberian Coastal Cities. *Water* 12, 1220. <https://doi.org/10.3390/w12041220>
- BAIN, P.G.; MILFONT, T.L.; KASHIMA, Y. *et al.* (2016): Co-benefits of addressing climate change can motivate action around the world. *Nat. Clim. Change* 6, 154-157. <https://doi.org/10.1038/nclimate2814>
- BARNETT, J.; O'NEILL, S. (2010): Editorial: Maladaptation. *Glob. Environ. Change* 20, 211-213. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2009.11.004>
- BIESBROEK, G.R.; KLOSTERMANN, J.E.M.; TERMEER, C.J.A.M. *et al.* (2013): On the nature of barriers to climate change adaptation. *Reg. Environ. Change* 13, 1119-1129. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0421-y>
- BURKE, M.; HSIANG, S.M.; MIGUEL, E. (2015): Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature* 527, 235-239. <https://doi.org/10.1038/nature15725>
- BURTON, I. (2004): Climate Change and the Adaptation Deficit. Environment Canada.
- CISCAR, J.C.; IBARRETA, D.; SORIA, A. *et al.* (2018): Climate impacts in Europe: Final report of the JRC PESETA III project (No. EUR 29427 EN). European Commission, Luxembourg.
- CMNUCC (2015): Acuerdo de París. Decisión CP/2015/L.9.
- EBI, K.L.; BERRY, P.; CAMPBELL-LENDRUM, CORVALAN, C. *et al.* (2013): Protecting health from climate change: vulnerability and adaptation assessment. World Health Organization, Geneva.
- FANKHAUSER, S. (2017): Adaptation to Climate Change. *Annu. Rev. Resour. Econ.* 9, 209-230. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100516-033554>
- FORD, J.D.; BERRANG-FORD, L. (2016): The 4Cs of adaptation tracking: consistency, comparability, comprehensiveness, coherency. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change* 21, 839-859. <https://doi.org/10.1007/s11027-014-9627-7>
- FORD, J.D.; BERRANG-FORD, L.; BIESBROEK, G. *et al.* (2015): Adaptation tracking for a post-2015 climate agreement. *Nat. Clim. Change* 5, 967-969. <https://doi.org/10.1038/nclimate2744>
- GOBIERNO VASCO (2015): Estrategia de Cambio Climático 2050 del País Vasco. Vitoria-Gasteiz.
- GONZALEZ-EGUINO, M., SAMPEDRO, J., GALARRAGA *et al.* (2018): La transición energética del País Vasco: Hacia un modelo sostenible Informe extraordinario de la institución del Ararteko al Parlamento Vasco). Ararteko, Vitoria-Gasteiz.
- GROOM, B. (2014): Discounting, in: Markandya, A., Galarraga, I., Sainz de Murieta, E. (Eds.), *Routledge Handbook of the Economics of Climate Change Adaptation*, Routledge International Handbooks. Routledge, Oxon (UK) and New York (USA), pp. 138-168.
- HARTIG, T.; MITCHELL, R.; DE VRIES, S. *et al.* (2014): Nature and Health. *Annu. Rev. Public Health* 35, 207-228. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-032013-182443>
- HEPBURN, C.; O'CALLAGHAN, B.; STERN, N. *et al.* (2020): Will COVID-19 fiscal recovery packages accelerate or retard progress on climate change? *Smith Sch. Work. Pap.* 20, 48.
- IPCC (2018a): Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- (2018b): Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)], in: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.O. *et al.* (Eds.), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- JONES, R.N.; PATWARDHAN, A.; COHEN, S.J. *et al.* (2014): Foundations for decision making, in: Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J. *et al.* (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adap-*

Presentation

Elisa Sainz de Murieta and Ibon Galarraga

1. Introduction

Climate change is one of the biggest challenges facing our societies. Many of the changes predicted by science are already evident and the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in its special report 1.5°C Global Warming warned of the vulnerability of certain natural or human systems that could be severely affected even by small increases in the average temperature of the planet. In order to avoid intolerable risks, it is unavoidable and urgent to implement mitigation and adaptation policies over the coming decades (IPCC, 2018a).

Climate policy priority and efforts have long been directed at reducing emissions. However, we now know that adaptation to climate change is also essential. The Paris Agreement, approved in 2015 and which has been ratified by 189 countries, includes in Article 2 the double objective of reducing greenhouse gas (GHG) emissions to maintain the increase in global average temperature well below 2°C (and continue efforts to limit that increase to 1.5°C); and improve the resilience¹ and adaptive capacity of our society to face the impacts of climate change (UNFCCC, 2015). There has been a fundamental change in international negotiations, which recognizes the need to address both options, mitigation and adaptation, together (Magnan y Ribera, 2016).

The IPCC defines adaptation in human systems as the «process of adjusting to the current or expected climate and its effects, trying to moderate the damages or take advantage of the beneficial opportunities». As for natural systems, this refers to the «process of adjustment to the current climate and its effects; human intervention can facilitate adjustment to the expected climate and effects» (IPCC, 2018b). But in practice, what is adaptation?

Adaptation policies and measures can be very different in nature and can occur with different time and spatial scales; they can materialize through infrastructures and technical solutions, but also through laws, regulations or changes in behaviour.

¹ IPCC (2018b) defines resilience as the «capacity of social, economic and environmental systems to tackle dangerous events, trends or disturbances responding or reorganising so as to maintain their essential function, identity and structure, at the same time as retaining their adaptive, learning and transformation capacity».

Thus, it is possible to find various types of classifications that follow different criteria. Table 1 shows some of the most common examples. This is precisely one of the difficulties that must be faced when trying to measure progress in adaptation: a diversity of methods, metrics, scales and benchmarks (Ford *et al.*, 2015). But, as we will show in the third section, in addition to some important challenges, adaptation also presents a series of opportunities to move towards a more resilient society to climate change, more sustainable and just.

In the Basque Country, the first planning tool that specifically mentions adaptation to climate change among its objectives is the Second Environmental Program (PMA 2007-2010), although the Basque Environmental Strategy for Sustainable Development 2002-2020 (EAVDS) included in Goal 5 «limiting the influence on climate change». The Basque Climate Change Strategy Klima 2050 has two main objectives: the first is to reduce emissions² and the second is «to ensure the resilience of Basque territories to climate change». Adaptation has become increasingly important in Basque climate policy hand in hand with this strategy, which includes several goals and lines of action that address adaptation to climate change. The Basque Country's draft law on climate change also includes among its objectives the need to make progress in adapting to climate change and incorporates various measures to promote the deployment of adaptation policies in a transversal and intersectoral manner.

In the context of the European Green Deal, the European Commission announced a European Climate Law as well as a new, more ambitious European Climate Change Adaptation Strategy, whose background document is currently open to public consultation. In Spain, for the first time, adaptation has been included in the purpose of the draft Climate Change Law that has just been submitted to the Congress of Deputies. This bill highlights the importance of adaptation, the need to tackle it to avoid or mitigate the impacts of climate change and also highlights its economic and social benefits. Likewise, the National Climate Change Adaptation Plan (PNACC) is established as the reference document and basic planning tool to promote adaptation action.

This special issue study includes different aspects of adaptation to climate change, as explained in section 2. In section 3 we identify the main challenges and opportunities that it poses and in section 4 we briefly reflect on the potential effects of COVID -19 on adaptation policies. Finally, in section 5 we suggest some policy recommendations that we consider important to promote adaptation actions.

² The first objective is actually a double objective that aims to reduce GHG emissions by at least 40% by 2030 and 80% by 2050 (taking the base year 2005 as a reference) and to achieve renewable energy consumption by 2050 40% in relation to final consumption.

Table 1. EXAMPLES OF ADAPTATION MEASURES & CRITERIA FOR CLASSIFICATION

Criteria	Classification	Examples
Nature of the agents involved	Public or private adaptation	- Public adaptation occurs when there is government intervention to support adaptation. For example, infrastructure construction or land development. - Private adaptation occurs when the measures are implemented by private individuals or entities. For example, flood insurance.
Spatial scale	Local or general	- Local adaptation refers to those options or measures implemented at a local (or regional) level, such as the construction of a certain protection infrastructure. - Health plans dealing with weather-related conditions are examples of general adaptation.
Timescale	Short or long term measures	- Short-term adaptation measures are those urgent measures to avoid or moderate climate change effects and current climate variability. For example, agricultural insurance. - Long-term adaptation solutions reduce vulnerability and increase resilience to cope with the expected long-term impacts. For example, rising sea levels.
Type of measure	Infrastructure, behaviour, institutional or financial information	- Infrastructures are constructions and technical solutions to tackle the impact of climate change. For example, land and urban planning, which incorporates climatic and resilience criteria. - Behavioural options are those focused on changing common behaviours or practices, such as agricultural practices or methods. - Institutional responses to climate change include policies, plans and other regulatory measures. - Financial options include measures such as economic or fiscal incentives for adaptation. - Information systems, such as early warning systems, provide data that can cope with certain impacts.
Capacity to respond when faced with uncertainty and/or tackle other associated benefits	No regret measures or low regret measures; win-win measures	- No regret options (no regret) are those measures that represent net benefits even in the absence of climate change, such as the start-up of early alert systems; low regret measures are those that have relatively low costs and great benefits, such as improving efficiency in irrigation systems. - Win-win or mutually beneficial measures, in addition to contributing to adaptation, also provide other social, economic or environmental benefits. For example, adaptation measures based on nature).

Source: Adapted from Sainz de Murieta et al. (2014).

2. Special issue contributions

This case study consists of ten articles that address adaptation to climate change from different perspectives.

Francesco Bosello and **Ramiro Parrado** present an introduction to the main methods for estimating the costs of climate change through macroeconomic models. They review different methodological approaches, analyse the differences between them and compare the main estimates they provide. **Alistair Hunt** and **Filippo Frascini** describe the potential use of Portfolio Analysis for decision-making regarding adaptation to climate change. This methodology used in financial economics is currently underused in contexts of climate change, but its usefulness in contexts of uncertainty has an interesting potential.

In the field of climate finance, **Itziar Ruiz-Gauna**, **Ibon Galarraga** and **Patxi Greño** assess the impact of the sustainable bonds issued by the Basque Government in 2018 in terms of the direct effects of individual projects and their indirect impact on production, income and employment in the Autonomous Community of the Basque Country.

The energy sector, traditional and widely studied from an emission reduction perspective, will not, however, be exempt from suffering impacts as a consequence of climate change. **Giuliano Girardi**, **Jose Carlos Romero** and **Pedro Linares** analyse the direct and indirect impacts of climate change for this sector in Spain and incorporate recommendations at the international and state level. **Silvestre García de Jalón** explores the role that ecosystems, in this case forests and trees, can play in reducing atmospheric pollutants and estimates the economic value of this ecosystem service.

In relation to climate change and extreme weather events, **Luis M^a Abadie** and **Marek Smid** calculate the impact of heat waves in three Basque coastal capitals. The authors carry out a probabilistic modelling up to 2100 of the frequency, duration and intensity of heat waves considering two emission scenarios. For their part, **Pablo Martínez-Juarez**, **Sébastien Foudi**, **Ibon Galarraga**, **Nuria Osés-Eraso** and **Emilio Cerdá** review the methodologies for assessing damage associated with flooding, as well as evaluating adaptation measures for these phenomena.

Cities are gaining great importance and prominence in the fight against climate change. It is estimated that they are responsible for around 70% of global emissions and at the same time they concentrate a large part of the world population and economic assets, so it is expected that the impacts of climate change may cause significant human, economic and physical damage (Revi *et al.*, 2014). They are also active agents in climate policy. The portal for Global Climate Action (NAZCA³) promoted by the United Nations collects the actions of more than 10,000 cities that have made

³ NAZCA Platform: <https://climateaction.unfccc.int/>

their climate commitments public. **Marta Olazabal** and **María Ruiz de Gopegui** analyse the impacts for which 11 Spanish cities are preparing with adaptation plans. The authors identify seven main climate threats and also study how important aspects, such as uncertainty or cascading impacts, are incorporated into impact assessments in these cities. Urban planning is a fundamental planning tool, but it also represents a liability, an inheritance that conditions both the way in which we can face impacts through adaptation policies and also GHG emissions through certain preferences for transport.

David Heres and **Rafael Dávila-Bugarín** address, precisely, the relationship between planning and the use of different modes of transport, as well as their implications in terms of pollution and CO₂ emissions.

The final article in this case study does not analyse adaptation to climate change directly, although it does so indirectly. Adaptation is closely related to other global goals, such as halting biodiversity loss, disaster risk reduction or the 2030 Agenda for Sustainable Development. Of the 17 sustainable development goals (SDGs) approved by all the member states of the United Nations in 2015, number 13 is dedicated to «Climate Action» and its first goal seeks, precisely, «to strengthen resilience and capacity adaptation» to climate risks. In this context, **Álvaro de Juanes** and **José Miguel Giner** elaborate a synthetic indicator to measure the progress of 100 Spanish cities towards sustainable development.

3. Challenges and opportunities of adaptation to climate change

In this section we present the most important messages that have been extracted from the collaborations in this case study, which we complement with evidence from scientific literature on the adaptation to climate change.

3.1. Challenges of adaptation to climate change

One of the main challenges of adaptation, as the contributions to this case study show, is **uncertainty** (Bosello and Parrado). Decision making in contexts of great uncertainty makes it difficult to use traditional economic assessment methods such as Cost Benefit Analysis (CBA) and various authors have stressed the need to use alternative assessment tools (Fankhauser, 2017). An example is adaptive risk management, which consists of defining cycles for monitoring, analysis, review and learning for continuous improvement and adaptation of strategies over time (Jones *et al.*, 2014 and Martínez-Juarez *et al.*) Other economic tools include probabilistic risk analysis (Abadie and Smid), real options, or portfolio analysis, which Hunt and Franchini detail in their article for this case study.

Another adaptation challenge is that, although some changes are already evident, the main impacts will occur over a **long-term time horizon** (Bosello and Parrado). This implies the need to characterize our society in the future through socio-

economic scenarios (Martinez-Juarez *et al.*) However, the net present value of the costs of future climate change depends, to a large extent, on the discount rates used. Markanday *et al.* (2019) present a review of the existing debate regarding discount rates to be used in contexts of climate change. In any case, it seems reasonable to suggest that intergenerational equity criteria should be considered in long-term projects, in such a way that no generation prevails over others, which implies the use of lower discount rates than usual or, alternatively, discount rates, social discount that decreases over time (Groom, 2014).

The impacts of climate change have important **distributional effects** (Girardi, Romero and Linares). There are estimates that climate change could reconfigure the global economy, although not all countries will be affected to the same extent (Bosello and Parrado; Burke *et al.*, 2015). While globally the costs of climate change could reach between 1% and 3.3% of GDP, losses could be much greater in parts of Africa, Southeast Asia or India. However, it is important to understand that distributional effects do not only occur globally, but also in our European context (see, for example, Ciscar *et al.*, 2018) where the countries of southern Europe and those most vulnerable groups will be disproportionately affected by climate change.

Adaptation must also face a series of **barriers** or difficulties for its effective development (Olazabal and Ruiz de Gopegui). The scientific literature has approached the analysis of adaptation barriers from different perspectives and prolifically during the last two decades. Biesbroek *et al.* (2013) identify a large number of barriers in a literature review and classify them into five categories: institutional, social, informational, financial, and cognitive.

Finally, another of the adaptation challenges refers to **monitoring and measuring** progress (Olazabal and Ruiz de Gopegui). Currently the implementation of adaptation shows a relatively small deployment and existing adaptation plans incorporate numerous actions related to the generation of knowledge (Lesnikowski *et al.*, 2016). Adaptation presents a series of difficulties that do not occur in the case of mitigation, such as the existence of various definitions and metrics for adaptation (Ford and Berrang-Ford, 2016), in addition to the rest of the challenges mentioned in this section.

3.2. *Adaptation opportunities*

The main objective of climate policies is the reduction of emissions and climate stabilization (Markandya and Rübelke, 2004), as well as increasing resilience and reducing vulnerability to climate change (Klein *et al.*, 2014), but many of these policies also generate additional or secondary benefits. The literature shows that additional climate policy benefits can be very important quantitatively, but considering these benefits also contributes to improving the acceptance of these policies (Longo *et al.*, 2012), overcoming scepticism and facilitating climate

action (Bain *et al.*, 2016). Co-benefits or side benefits are often ignored, although studies analysing these benefits have increased significantly over recent years.

The classic example of these secondary benefits is improved health as a consequence of emission reduction policies, which also lead to less air pollution (Heres and Dávila-Bugarín). However, and although they have been studied to a lesser extent, adaptation policies also offer **additional benefits and opportunities**, beyond avoiding or minimizing the damage caused by climate change (Olazabal and Ruiz de Gopegui).

Surminski and Tanner (2016) defined the triple dividend of resilience. The first dividend refers to reducing climate change damage, the second dividend seeks to harness the economic potential of adaptation, and the third focuses on economic, social and environmental co-benefits.

The **economic co-benefits** of adaptation are diverse, such as lowering baseline risk, which can help drive entrepreneurship and investment, and ultimately economic growth. Furthermore, adaptation can improve responsiveness to current climate variability without considering climate change, that is to say, reducing the adaptation deficit, as we saw earlier. Likewise, it represents an economic opportunity for the development of new goods and services (Klein *et al.*, 2014). Ruiz-Gauna *et al.* illustrate precisely how investment in sustainable bonds has contributed, indirectly, to production, income and employment in the Basque Country.

In the **social sphere**, the co-benefits of adaptation include examples related to human health, such as public health and emergency policies, measures that promote sustainable and healthy behaviours (Ebi *et al.*, 2013), the various benefits of green spaces in urban areas (Hartig *et al.*, 2014; Olazabal and Ruiz de Gopegui), or their contribution to sustainable development goals (de Juanes and Giner). Recent studies also address the importance of the contribution of adaptation to the construction of social capital, through the creation of networks and the strengthening of community and social interrelationships (Tanner *et al.*, 2016). Nature-based measures provide numerous examples of the potential **environmental co-benefits** of adaptation, such as green infrastructures for coastal or flood protection, watershed management options to ensure water availability, or protection and improvement of biodiversity. Furthermore, these benefits can be quantified and their monetary value can be assessed, as shown by García de Jalón.

The co-benefits of adaptation may also be especially relevant if we consider that its primary benefits (minimizing the impacts of climate change) are often only observed in the long term or in the case of probabilistic impacts, such as extreme weather events. Many of the co-benefits of adaptation, however, can be enjoyed in the short term and even in the absence of climate change (Tanner *et al.*, 2016).

4. Adaptation in the post-COVID society

At the time of writing this presentation the Basque society is phasing out lock-down and this may generate additional reflections, since one of the characteristics that adaptation and the post-pandemic situation share is uncertainty. It is still premature and perhaps daring to carry out exhaustive analyses of the implications that COVID-19 may have on climate policy in general, and adaptation in particular. However, as coordinators of this special issue we would like to share some thoughts. First, the pandemic seems to have awakened a sense of vulnerability, both individually and collectively, in our society as a whole. In this sense, we suggest exploring strategies that increase the **resilience** of our society to different situations (climatic or pandemic). Second, this crisis represents an **opportunity** for stimulus measures that are to be aligned with the necessary and urgent climate response. The United Nations (2020) has called for this opportunity to «build back better» once the pandemic has been overcome, borrowing a concept used in recovery contexts in post-disaster situations. A recent study by leading economists such as Joseph Stiglitz or Nicholas Stern, identifies a series of green stimulus policies with the potential to respond to the post-pandemic situation and the climate crisis, while also providing additional social and environmental co-benefits that contribute to reduce inequality. These policies are: (i) investments in infrastructure that they call «clean» (referring, for example, to the commitment to renewable energy); (ii) promotion of energy efficiency in buildings; (iii) investments in education and training to respond to unemployment in line with the needs of the transition to a low carbon economy; (iv) commitment to natural capital, to support the regeneration and resilience of ecosystems; (v) support for research and development (Hepburn *et al.*, 2020).

5. Policy recommendations

As we have seen, adaptation policies must face some challenges and at the same time represent an opportunity to move towards more resilient societies. The Basque Country has its 2050 Climate Change Strategy, which defines as strategic objectives the reduction of emissions and deployment of renewable energy and guaranteeing the resilience of our territory to climate change (Basque Government, 2015). Below, some actions are suggested that may be additional or complementary to those proposed in the 2050 Climate Change Strategy.

a. *Better understand the potential impacts of climate change*

There are some impacts for which there is still insufficient information, for example, those related to water resources, transport or biodiversity. In relation to economic costs, there are some studies in the Basque Country that address certain impacts, usually related to extreme events such as floods (Osés-Eraso, 2009), but it would be desirable to have a more complete perspective of the various sectors, with

interrelationships between them, including estimates of the Basque economy in terms of the impact on GDP or employment.

In addition, and as global temperatures continue to rise, it would be important to explore the impact of low-probability high-damage events and possible tipping points that could affect the Basque Country, not only climatic (Kopp *et al.*, 2016) but also socioeconomic events (see, for example, van Ginkel *et al.*, 2019).

b. Identify the opportunities, costs and benefits of adaptation in the Basque Country

Although this point has been addressed in a general way in this presentation (a more detailed review can be seen in Sainz de Murieta, 2019), it is important to assess specifically how to exploit adaptation opportunities in the Basque Country, as well as the co-benefits. There is ample evidence that the direct benefits of adaptation, in terms of avoided damage, often far outweigh its costs (see, for example, Abadie *et al.*, 2020, which includes estimates for Bilbao and Donostia-San Sebastián). Knowing this relationship between the costs and benefits of adaptation, even in uncertain contexts, could give an important boost to its planning and implementation.

Risk affects and is perceived differently by different actors, since they may present diverse exposures, vulnerabilities, attitudes and capacities to face the risks of climate change. As a result, risk preferences are highly dependent on social, cultural, and economic contexts. In this sense, considering social and behavioural aspects is also of great relevance for adaptation.

c. Identify and implement the necessary tools to support adaptation

In general, governments are making a limited deployment of tools for adaptation. In a survey carried out through the Regions4 network in various regional governments, they indicated that the most common tools in adaptation contexts, both at regional and state levels, were climate change programmes, information and training measures, and regulation frameworks, although even these did not exist in most regions (RegionsAdapt, 2019). Plans and programmes are the most widespread tools, even though a study of 885 European cities showed that only 26% had an adaptation plan, compared to 66% that had mitigation plans (Reckien *et al.*, 2018). In Spain, only 11 provincial capitals have an adaptation plan (Sainz de Murieta *et al.*, 2020).

Approval of the draft law on climate change in Spain can be an important milestone to promote adaptation policies in the State, whose development through the PNACC should include the periodic assessment of climate change impacts, vulnerability and risks, the definition indicators and periodic monitoring or the need to involve agents in the adaptation processes. The approval of a law of its own that gives a boost to adaptation in the specific context of the Basque Country, following the

example of other regional governments such as Scotland, would also be an important measure to reinforce the implementation of climate change adaptation.

d. Establish coordination mechanisms between adaptation and mitigation policies

Although mitigation and adaptation policies are very different in nature and are usually coordinated even from different departments, it is important to explore the interrelationships and synergies between them. First, we must not forget that achieving greater GHG reductions globally will translate into minor impacts and therefore a lesser need for adaptation. Second, the design of tools that can favour the implementation of both types of policies could also be explored. Lastly, coordination mechanisms could also avoid cases of maladaptation, which are those actions defined to reduce impacts or vulnerability to climate change that increase the vulnerability of other systems, sectors or social groups (Barnett and O'Neill, 2010). Although there are different types of maladaptation, in this case we would be talking about adaptation measures that increase emissions. The classic example is the use of air conditioning to cope with extreme heat.

e. Incorporate distributive criteria, gender, equity and justice

There are important **distributional effects** to consider when evaluating the impacts of climate change. Impoverished countries will suffer more from these effects, as will women and the most disadvantaged and vulnerable groups. Regarding the **gender perspective**, member countries of the United Nations Framework Convention on Climate Change approved a Gender Action Plan at the summit held in December 2019 in Madrid, a milestone that recognizes the importance of considering not only the uneven impacts of climate change on women and girls, but also the need for adaptation to incorporate measures to ensure equality. Although these aspects have been included in the literature, especially on impacts, in practice we can observe that integration into adaptation plans and programmes is still limited. This is, however, a key issue to achieve a more progressive and, ultimately, just distribution of resources (Watkiss and Cimato, 2016).

REFERENCES

- ABADIE, L.M.; SAINZ DE MURIETA, E.; GALARRAGA, I. (2020): The Costs of Sea-Level Rise: Coastal Adaptation Investments vs Inaction in Iberian Coastal Cities. *Water* 12, 1220. <https://doi.org/10.3390/w12041220>
- BAIN, P.G.; MILFONT, T.L.; KASHIMA, Y. *et al.* (2016): Co-benefits of addressing climate change can motivate action around the world. *Nat. Clim. Change* 6, 154–157. <https://doi.org/10.1038/nclimate2814>
- BARNETT, J.; O'NEILL, S. (2010): Editorial: Maladaptation. *Glob. Environ. Change* 20, 211–213. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2009.11.004>
- BIESBROEK, G.R.; KLOSTERMANN, J.E.M.; TERMEER, C.J.A.M. *et al.* (2013): On the nature of barriers to climate change adaptation. *Reg. Environ. Change* 13, 1119–1129. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0421-y>
- BURKE, M.; HSIANG, S.M.; MIGUEL, E. (2015): Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature* 527, 235–239. <https://doi.org/10.1038/nature15725>
- BURTON, I. (2004): Climate Change and the Adaptation Deficit. Environment Canada.
- CISCAR, J.C.; IBARRETA, D.; SORIA, A. *et al.* (2018): Climate impacts in Europe: Final report of the JRC PESETA III project (No. EUR 29427 EN). European Commission, Luxembourg.
- CMNUCC (2015): Acuerdo de París. Decisión CP/2015/L.9.
- EBI, K.L.; BERRY, P.; CAMPBELL-LENDRUM, CORVALAN, C. *et al.* (2013): Protecting health from climate change: vulnerability and adaptation assessment. World Health Organization, Geneva.
- FANKHAUSER, S. (2017): Adaptation to Climate Change. *Annu. Rev. Resour. Econ.* 9, 209–230. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100516-033554>
- FORD, J.D.; BERRANG-FORD, L. (2016): The 4Cs of adaptation tracking: consistency, comparability, comprehensiveness, coherency. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change* 21, 839–859. <https://doi.org/10.1007/s11027-014-9627-7>
- FORD, J.D.; BERRANG-FORD, L.; BIESBROEK, G. *et al.* (2015): Adaptation tracking for a post-2015 climate agreement. *Nat. Clim. Change* 5, 967–969. <https://doi.org/10.1038/nclimate2744>
- GOBIERNO VASCO (2015): Estrategia de Cambio Climático 2050 del País Vasco. Vitoria-Gasteiz.
- GONZALEZ-EGUINO, M., SAMPEDRO, J., GALARRAGA *et al.* (2018): La transición energética del País Vasco: Hacia un modelo sostenible Informe extraordinario de la institución del Ararteko al Parlamento Vasco). Ararteko, Vitoria-Gasteiz.
- GROOM, B. (2014): Discounting, in: Markandya, A., Galarraga, I., Sainz de Murieta, E. (Eds.), *Routledge Handbook of the Economics of Climate Change Adaptation*, Routledge International Handbooks. Routledge, Oxon (UK) and New York (USA), pp. 138–168.
- HARTIG, T.; MITCHELL, R.; DE VRIES, S. *et al.* (2014): Nature and Health. *Annu. Rev. Public Health* 35, 207–228. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-032013-182443>
- HEPBURN, C.; O'CALLAGHAN, B.; STERN, N. *et al.* (2020): Will COVID-19 fiscal recovery packages accelerate or retard progress on climate change? *Smith Sch. Work. Pap.* 20, 48.
- IPCC (2018a): Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- (2018b): Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)], in: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.O. *et al.* (Eds.), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- JONES, R.N.; PATWARDHAN, A.; COHEN, S.J. *et al.* (2014): Foundations for decision making, in: Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J. *et al.* (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, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, pp. 1-32.
- KLEIN, R.J.T.; MIDGLEY, B.L.; PRESTON, B.L. *et al.* (2014): Adaptation opportunities, constraints, and limits, in: Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J. *et al.* (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, Cambridge, pp. 899-943.
- KOPP, R.E.; SHWOM, R.L.; WAGNER, G. *et al.* (2016): Tipping elements and climate-economic shocks: Pathways toward integrated assessment. *Earths Future* 4, 2016EF000362. <https://doi.org/10.1002/2016EF000362>
- LESNIKOWSKI, A.; FORD, J.; BIESBROEK, R. *et al.* (2016): National-level progress on adaptation. *Nat. Clim. Change* 6, 261-264. <https://doi.org/10.1038/nclimate2863>
- LONGO, A.; HOYOS, D.; MARKANDYA, A. (2012): Willingness to Pay for Ancillary Benefits of Climate Change Mitigation. *Environ. Resour. Econ.* 51, 119-140. <https://doi.org/10.1007/s10640-011-9491-9>
- MAGNAN, A.K.; RIBERA, T. (2016): Global adaptation after Paris. *Science* 352, 1280-1282. <https://doi.org/10.1126/science.aaf5002>
- MARKANDYA, A.; GALARRAGA, I.; CHIABAI, A. *et al.* (2019): Determining discount rates for the evaluation of natural assets in land-use planning: An application of the Equivalency Principle. *J. Clean. Prod.* 230, 672-684. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.107>
- MARKANDYA, A.; RÜBBELKE, D.T.G. (2004): Ancillary Benefits of Climate Policy / Sekundäre Nutzen der Klimapolitik. *Jahrb. Für Natl. Stat.* 224, 488-503. <https://doi.org/10.1515/jbnst-2004-0406>
- OSÉS ERASO, N. (2009): Costes del cambio climático en el País Vasco por riesgo de inundación. *Ekonomiaz* 71, 62-83.
- RECKIEN, D.; SALVIA, M.; HEIDRICH, O. *et al.* (2018): How are cities planning to respond to climate change? Assessment of local climate plans from 885 cities in the EU-28. *J. Clean. Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.220>
- REGIONSADAPT (2019): Climate change adaptation in a multi-level governance context: a perspective from subnational governments. *Regions* 4.
- REVI, A.; SATTERTHWHITE, D.E.; ARAGÓN-DURAND, F. *et al.* (2014): Urban areas, in: Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J. *et al.* (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, Cambridge, pp. 535-612.
- SAINZ DE MURIETA, E.; GALARRAGA, I.; MARKANDYA, A. (2014): An introduction to the economics of adaptation to climate change, in: Markandya, A., Galarraga, I., Sainz de Murieta, E. (Eds.), *Routledge Handbook of the Economics of Climate Change Adaptation, Routledge International Handbooks*. Routledge, New York, pp. 3-26.
- SURMINSKI, S.; TANNER, T. (Eds.) (2016): *Realising the «Triple Dividend of Resilience.»* Springer Berlin Heidelberg, New York, NY.
- TANNER, T.; SURMINSKI, S.; WILKINSON, E. *et al.* (2016): The triple dividend of resilience: a new narrative for disaster risk management and development, in: Surminski, S., Tanner, T. (Eds.), *Realising the «Triple Dividend of Resilience.»* Springer Berlin Heidelberg, New York, NY, pp. 1-30.
- UNITED NATIONS (2020): Climate Change and COVID-19: UN urges nations to ‘recover better’ [WWW Document]. U. N. URL <https://www.un.org/en/un-coronavirus-communications-team/un-urges-countries-%E2%80%98build-back-better%E2%80%99> (accessed 5.11.20).
- VAN GINKEL, K.; BOTZEN, W.J.W.; HAASNOOT, M. *et al.* (2019): Climate change induced socio-economic tipping points: review and stakeholder consultation for policy relevant research. *Environ. Res. Lett.* <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6395>
- WATKISS, P.; CIMATO, F. (2016): *The Economics of Adaptation and Climate-Resilient Development: Lessons from Projects for Key Adaptation Challenges (Working Paper No. 235)*. Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London.

Macro-economic assessment of climate change impacts: methods and findings

The paper introduces the challenges posed by the macro-economic assessment of climate change impacts and describes the main investigation methodologies used by the economic literature to address these challenges. Strengths and weaknesses of the different approaches are presented. The paper then presents the major findings from this literature providing a critical guidance in their interpretation. The paper concludes highlighting policy implications and discussing the evolution of the research developments in the future.

El artículo presenta los retos planteados en la evaluación macroeconómica de los impactos del cambio climático y describe las principales metodologías de investigación utilizadas en la literatura económica para abordar estos desafíos. Una vez que se presentan las fortalezas y debilidades de los diferentes enfoques, el artículo muestra los principales hallazgos de esta literatura proporcionando una guía crítica para su comprensión. El documento concluye destacando las implicaciones políticas y debatiendo la evolución de la investigación en el futuro.

Klima-aldaketaren inpaktuen ebaluazio makroekonomikoan planteatutako erronkak aurkezten ditu artikulua, eta erronka horiei aurre egiteko literatura ekonomikoan erabilitako ikerketa-metodologia nagusiak deskribatzen ditu. Ikuspegi desberdinen indarguneak eta ahuleziak aurkeztu ondoren, artikulua literatura horren aurkikuntza nagusiak erakusten ditu, artikulua ulertzeko gida kritikoa ematen baitu. Amaieran, ondorio politikoak nabarmentzen ditu eta etorkizuneko ikerketa-garapenak eztabaidatzen ditu.

Francesco Bosello

*Dipartimento di Scienze e Politiche Ambientali
Università degli Studi di Milano, Milano*

*RFF-CMCC European Institute on Economics and the Environment (EIEE),
and Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC), Italia*

Ramiro Parrado

*RFF-CMCC European Institute on Economics and the Environment (EIEE),
Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC),
Italia, and Università Ca' Foscari, Venezia, Italia*

Table of contents

1. Introduction
2. Challenges in macro-economic assessment of climate change impacts
3. Cost definition and methodological approaches
4. Summary of cost estimates
5. Discussion
6. Conclusion

References

Keywords: Climate change impacts, macro-economic assessment, climate change cost, social cost of carbon.

Palabras clave: Impactos del cambio climático, evaluación macroeconómica, coste del cambio climático, coste social del carbono.

JEL codes: Q54, F64, Q51

Entry date: 2020/02/28

Acceptance date: 2020/04/23

1. INTRODUCTION

Assessing the economic costs of climate change impacts faces several challenges that emerged evidently since the first estimates were published in the early 90s'. Economic estimates are particularly uncertain and, therefore, debatable, for many reasons. Firstly, they cannot help incorporating the uncertainty transmitted across the evaluation chain by the other non-economic disciplines that necessarily concur in the assessment. Secondly, they have to incorporate social or human reactions, which are inherently unpredictable. Thirdly, they cannot avoid elements of subjectivity coming from the evaluator herself/himself. On the one hand, as a reaction, the economic assessment of climate change translated into the development and applica-

tion of a wide range of different methodologies trying to respond to the different challenges. Probably, the most distinctive example of this process is the birth of integrated assessment models. However, many other quantitative and qualitative investigation approaches have been used. On the other hand, the consequence of this multi-disciplinarity and methodological diversity is a wide range of cost estimates and even of cost concepts that may confuse the non-expert. In fact, as will be highlighted in the paper, there are results which are extremely robust across the different assessments. More importantly, the differences, when present, can be explained and motivated. They all concur in defining the economic implications of climate change and need to be interpreted organically.

The aim of this paper is to help orientating in this wide, constantly developing and almost 30 years old literature by clarifying concepts, methodologies, estimates and the interpretation of the economic impacts of climate change. A precious help in this endeavour is offered by recent meta-analyses that did for us the work of combining the available climate change cost estimates into a summarizing and structured framework. We revise further studies shedding light on the important equity consequences of climate change considering either spatial or income distribution issues. Finally, this paper adopts a macro-economic or aggregated perspective. That is, it refers only marginally to all the literature, albeit important and perhaps wider, that assesses local impacts and costs of climate change.

The paper is structured as follows. Section 2 introduces the challenges posed by the macro-economic assessment of climate change impacts. Section 3 describes the different cost concepts applied and introduces the main investigation methodologies used by the economic discipline. Section 4 critically summarizes the major findings from the literature. Section 5 discusses the strengths and weaknesses of the different assessment approaches providing critical guidance in their interpretation. Section 6 concludes and discusses future research developments.

2. CHALLENGES IN THE MACRO-ECONOMIC ASSESSMENT OF CLIMATE CHANGE IMPACTS

In the spirit of the many surveys on the macro-economic assessments of climate change impacts (see e.g. Sanstad and Greening, 1998; Bosello, 2014; Auffhammer, 2018) we cannot avoid to briefly mention the enormous challenges that these assessments have to face.

The keyword is uncertainty. In rigorous terms, uncertainty is a situation in which the probability distribution function associated to a given event is not defined exactly (Knight, 1922). This situation is pervasive in all the investigation phases that eventually lead to an economic, or more correctly, a socio-economic evaluation of climate change impacts. Typically, the reaction of the climate system (usually interpreted as a variation of global temperature) to increasing concentrations of GHG, as

well as the reaction of the environmental system to climate change stressors, are not perfectly known. These uncertainties clearly affect the economic evaluation. In addition, economic assessments of climate change suffer from their own peculiar uncertainty sources. These are: the intertemporal dimension, the global dimension and the non-market dimension of the problem.

The intertemporal dimension of climate change implies that climate change impact and policy assessments need to evaluate costs and benefits not only for the present, but also for the future (often far future) generations. This originates two different, albeit connected, issues. The first is the need to characterize the future society. Indeed, the type of society impacted – i.e. its wealth, its technology, its demographic structure etc. – do play a role in the determination of impacts. It influences what the IPCC defines as the exposure and vulnerability components of climate change risk (IPCC, 2014). Due to the near impossibility to forecast societal development fifty or more years ahead, this issue is typically accommodated through the use of scenarios based on storylines. These storylines are internally consistent descriptions (i.e. not predictions) of how the future may unfold. The Shared Socioeconomic Pathways, SSPs (Riahi *et al.*, 2017), are just the last out of many examples in this field. The second problem pertains to the evaluation of streams of costs and benefits occurring at different times. This implicitly asks for weighting the present against the future to reach comparable and/or aggregated measures of costs and benefits over time. This process originates the well-known problem of discounting (Pearce *et al.*, 1996): each weighting system unavoidably introduces an element of subjectivity in the assessment.

The global dimension of climate change poses somewhat similar challenges. There is firstly the complexity linked to an evaluation of impacts that are highly diversified by type and region. Furthermore, the problem arises of either comparing or aggregating losses and gains for different societies or societal groups. This process of horizontal aggregation can eventually be performed, but, once again, using some equity-weighting systems. These systems, however, cannot avoid an element of subjectivity (Anthoff *et al.*, 2009).

The last source of uncertainty reported here, refers to the existence of climate-change gains and losses induced on non-market goods and services. Often, climate change impacts affect items which are highly relevant for human welfare but are not traded in official markets. Typical examples are the supporting and regulating services of ecosystems and biodiversity. Therefore, in many circumstances, the economic evaluation cannot benefit from the support of prices that, as imperfect indicators they may be, are anyway a starting point for an economic assessment. In particular cases (i.e. that of cultural services), the benefits originated and potentially at risk are not even related to the use of the service itself, but to its mere existence. No observable transaction or behavior can thus reveal the value lost or gained. Contingent valuation techniques or their evolution, choice experiments, have been developed to elicit these values. Nonetheless, notwithstanding continuous improve-

ments, these methodologies, based on direct interviews/surveys, cannot totally eliminate the biases of responses determined by the hypothetical nature of the experiment. Furthermore, the results of these exercises are context specific and are difficult to generalize.

All this said, notwithstanding the uncertainties, current macroeconomic assessments provide enough information on costs of climate change and of climate change policies to offer some useful support to policymaking.

3. COST DEFINITION AND METHODOLOGICAL APPROACHES

The literature proposes different perspectives to consider climate change costs. The first refers to the concept of the social cost of carbon. This is defined as the money evaluation of the long-term damages produced by one unit (ton) of CO₂ (or carbon) emitted into the atmosphere. Economically speaking, it is a marginal cost concept (Anthoff *et al.*, 2009, Arent *et al.*, 2014). The second is a more aggregated measure where costs are expressed in terms of lost gross domestic product (GDP) (or of other indicators of economic performance) for a country, region, or community. Usually, these last exercises specify costs in given combinations of climate change and socio-economic scenarios (Riahi *et al.*, 2017).

Another differentiation distinguishes direct from indirect costs. The former accounts for an immediate economic evaluation of damages where a physical loss (e.g. of land, capital, but also life) is multiplied by a price. The latter takes into account the adjustments in the economic system triggered by the initial negative shocks. Changes in GDP are typical indicators of indirect costs as this variable should capture how the ability to produce goods and services of an economic system, considered with all its interactions and feedback, is affected by a climatic stressor.

There are also different methodologies used to perform the economic assessment that we group in three broad categories. The first makes use of simulation models, the second uses statistical/econometric approaches, and the third is the elicitation of expert opinions.¹

Models used for the macroeconomic assessment of climate change impacts and policies are of many types and nature (for a comprehensive treatment of these see e.g. Sathaye and Shukla, 2013; Bosello, 2014). Their common feature is, however, to use explicit relations (structural or behavioral equations), to describe, even though in a simplified way, the process leading to the final economic outcome. Integrated Assessment Models (IAMs) offer a topical example in this vein: they summarize in a

¹ For the sake of the discussion we present the three methodologies as separated, however they are strictly intertwined. For instance, either the econometric instrument or expert elicitation are amply used to parameterize the structural relations, including the damage functions informing integrated assessment and economic models.

unifying mathematical structure (i.e. a single equation system) the causal chain going from climate pressures to socioeconomic reactions, costs and the related feedback. Enabling the joint description of the climate, the environment and the social-economic system within one model, a process called hard-linking, requires huge simplifications. In IAMs (that, can be extremely complex), this translates into the use of reduced-form relations. These are equations that compact with relatively few parameters complex behaviors, for instance, of the climate system in response to GHG emissions, or of the economic system (in the form of GDP, income, welfare losses) in response to temperature increase. The latter case originates reduced-form climate change damage functions. Examples in this vein are offered by models like: RICE (Nordhaus and Yang, 1996), FUND (Tol, 2006), and WITCH (Bosetti *et al.*, 2006). This simplification is at the same time the major pro and con of IAMs. On the one hand, it enables the study of complex dynamic and interacting decision processes; on the other hand, it can do this just «on aggregate», losing many specificities of the causal links and becoming more able to describe a result than to explain it.

However, also more traditional macroeconomic models like macro-econometric models or, especially, computable general equilibrium models are supporting climate change impact assessment. They do this downstream, i.e. processing climate change impact information from other models (e.g. crop, sea-level rise, energy, etc.), to get the final economic cost estimate. This is the so-called soft-link approach, where different models exchange information through an output-input-output process. This methodology allows to couple different models from different disciplines without the need to excessively simplify the different processes. However, it requires more computational time and power needed to operate many different models in sequence. Examples of this literature include: Kainuma *et al.* (2003), Bosello *et al.* (2012), Stehfest *et al.* (2014), Ciscar *et al.* (2018), Dellink *et al.* (2019).

Another stream of impact assessment studies uses econometric approaches. Notwithstanding the technical differences pertaining to the many different methodologies applicable (spanning from the analysis of cross section to panel data, country-level to spatially explicit data), their common feature is to estimate relations from past evidence to then project these relations into the future. Econometrics has been thus amply applied to estimate the impact of climate change on many dimensions relevant for human welfare (see e.g. Carleton and Hsiang, 2016 for a survey). Part of this literature analyses historical data to identify and estimate the relationship between observed changes in climate or weather and impact endpoint indicators such as GDP or income (see e.g. Dell, *et al.*, 2012; Burke *et al.*, 2015; Kahn *et al.*, 2019).

The last methodology applies expert elicitation. It consists of asking recognized experts to express their informed quantification (of different types) of climate change damages, under different climate scenarios usually coupled with confidence intervals and self-assessment on the degree of expertise. These methods are typically used when the evaluation refers to circumstances whose quantitative knowledge is

extremely uncertain/low. They are meant either to replace or support quantitative approaches still insufficiently precise or to test the degree of confidence of experts in their modelling tools. Examples of these are Kriegler *et al.* (2009), Pindyck (2019), and also part of the parameterization of the damage function of the RICE model (Nordhaus and Boyer, 2000).

The next sections will present the findings of this literature in more detail.

4. SUMMARY OF COST ESTIMATES

4.1. Aggregate estimates

Many are the studies conducted to assess the economic costs of climate change. All of them rely on one or more of the methodologies cited in section 3 to provide estimates for different regions of the world and considering also a variegated set of climate impacts. Along time, a series of meta-analyses has been developed to synthesise the corpus of damage estimates and to systemize it according to the different characteristics of the studies. Examples of these meta-analyses are Tol (2018), Howard and Sterner (2017), Newbold and Marten (2014), Nordhaus (2013), and Tol (2009). This section draws from the most recent two meta-analyses, being also the most complete.

Tol (2018) reviews 22 studies containing 27 estimates of the total economic impact of climate change measured in terms of welfare equivalent-income loss and considering temperature increases with respect to preindustrial levels. According to those studies, there could be a benefit from global warming below 1.7°C, while for temperature increases above that level, net damages will be experienced. On average, the impacts of a 2.5°C increase of global mean temperature, translates into a 1.3 per cent of income loss for the average person. However, there is quite some disagreement about the size and sign of the impact across studies for the same level of warming (Tol, 2018). The studies examined, provide comparative static impacts, but there is the possibility that climate change could affect also the growth rate of the economy when analysed in a dynamic framework (Bretschger and Valente, 2011; Bosello and Parrado, 2014; Dellink *et al.*, 2019; Eboli *et al.*, 2010; Fankhauser and Tol, 2005; Hallegatte, 2005; Lemoine and Kapnick, 2016). This highlights the importance of looking not only at the effects on final output but also at the indirect effects that may affect productive processes which could be harmed and therefore reduce the expected economic growth in the future.

In another meta-analysis, Howard and Sterner (2017) review 41 studies including studies from grey literature. The final selection of 20 studies reporting 26 non-duplicate estimates is used to estimate the global willingness to pay to avoid total impacts of climate change measured as percentage of global GDP. Results from the study suggest that climate damages are likely between 7%-8% of GDP for a 3°C temperature increase when catastrophic risks are not factored in, while damages would rise to 9%-10% when these risks are included in the estimation.

The study also classifies damage estimates into six categories depending on the estimation methodology (Table 1).² The first category represents what the authors define the enumerative strategy. It is based upon bottom-up or sectoral economic impact assessments that are then aggregated to get insights into the total cost of climate change. Fankhauser (1995) and Tol (2002a,b) represent prominent examples in this field. Enumerative approaches have often provided the basis for the calibration of the reduced-form climate change damage function of IAMs.³ These estimates report what in section 2 has been defined as the direct costs of climate change. Enumerative approaches indicate estimates ranging between a net benefit of 2.3% of GDP and a damage of 11.5% for a temperature increase between 1°C and 3°C. The second category regards expert elicitation. These assessments express losses in the range of 0% - 10.2% of GDP for a range of temperature increase between 1°C and 6°C.

Econometric evidence is divided into cross-section and panel regression results. The former highlights values ranging from a benefit of 0.1% to a damage of 16.3% of GDP for temperature increase between 0.7°C and 3.2°C. Panel regression estimates group more recent studies relating weather-climate and GDP data over time. Damages are estimated between 0.3% and 23% of GDP for temperature increases between 3.4°C and 4.3°C. The fifth category is represented by CGE models. These are able, starting from enumerative bottom-up estimates, to provide economic damage assessment accounting for market adaptation and economic feedbacks. They offer an evaluation of the indirect costs of climate change. CGE damage estimates are between 0.2% and 4.6% for temperature increases in the range of 1.5°C and 4.8°C. The last category represents science-based damage estimates. These consider physical thresholds to derive the damage estimates and are definitely in the higher range featuring losses of 4.9% to 99% of GDP for temperature increases between 3°C and 12°C.

Table 1. RANGE OF DAMAGE ESTIMATES BY CATEGORY OF STUDY

Estimate category	Temperature increase range	GDP variation
Enumerative	1°C - 3°C	2.3% to -11.5%
Expert elicitation	1°C - 6°C	0% to -10.2%
Cross sectional	0.7°C - 3.2°C	0.1% to -16.3%
Panel	3.4°C - 4.3°C	-0.3% to -23%
Computable General Equilibrium (CGE)	1.5°C - 4.8°C	-0.2% to -4.6%
Science-based	3°C - 12°C	-4.9% to -99%

Source: Howard and Sterner (2017).

² For a discussion of the pros and cons of each damage estimate category see section 2 of Howard and Sterner (2017).

³ More recently, the enumerative approach has been applied also to quantify adaptation cost and effectiveness and to calibrate adaptation modules in IAMs (de Bruin *et al.*, 2009; Agrawala *et al.*, 2011; Bose-llo *et al.*, 2013).

4.2. Distributional Issues

Global estimates provide an idea of the average cost of climate change impacts, but it is also important to consider their distributional effects accounting for large asymmetries both in impacts and in the country and regional social-economic characteristics. The consolidated result from the literature is that poorer areas are more adversely affected than the richer ones (Table 2). In this vein, just to quote a recent contribution, Dellink *et al.* (2019), use a dynamic recursive CGE to analyse six types of impacts in a general equilibrium framework (agriculture, coastal zones, energy demand, extreme precipitation events, health and tourism demand). They find that for a temperature increase of 2.5°C the global average loss of GDP is 2%, with health and agriculture contributing to 0.9%, and 0.8% of total GDP loss respectively. However, for the same global temperature increase, the Middle East and Northern Africa lose 3.3%, South and South-East Asia 3.7%, Sub-Saharan Africa 3.8%, India more than 4% of GDP. These figures are in stark contrast with GDP losses in developed regions: OECD Europe loses 0.2%, OECD Pacific 0.3%, OECD America 0.6%, and USA around 0.5% of GDP.

Similar conclusions are drawn by Diffenbaugh and Burke (2019) using not simulation models, but fixed-effect panel econometrics to measure the effects on economic inequality of global warming. The study finds a very high likelihood of increased economic inequality between countries due to anthropogenic climate forcing; and larger decreases in GDP per capita for most poor countries due to global warming.

There are several factors leading to this outcome: developing countries are, for their majority, located at middle and low latitudes where global warming is more severe; these economies are also more dependent upon agriculture, which is a sector more sensitive to climatic variations; finally, these countries are endowed with a lower adaptive capacity deriving from limitation related to institutional and economic aspects. Indeed, these considerations led the IPCC's Fifth Assessment Report (AR5) to explicitly include equity issues among the five major «reasons for concern» related to climate change (IPCC, 2014).

Nonetheless, climate change can exert unequal macroeconomic impacts also across developed regions. An example in this direction is the recently concluded PESETA III project (Ciscar *et al.*, 2018) that analyses the economic impacts of climate change in the EU, considering temperature increases of 2°C and 3°C by 2071-2100. It shows that the European Union as a whole could lose between 0.55% and 2% of GDP for those temperature increases. However, while northern European regions are projected to lose less than 1% of GDP, South Central Europe is expected to lose between 0.81%-2.57% of GDP and Southern Europe between 1.65% and 4.2% (Ciscar *et al.*, 2018).

**Table 2. DISTRIBUTION OF GDP IMPACTS OF CLIMATE CHANGE
ACCORDING TO DIFFERENT STUDIES**

Study	Warming	Impact at the global level	Worst-off region		Best-off region	
	°C	% GDP	% GDP	Name	% GDP	Name
Nordhaus (1994)	3.0	-1.3	--	--	--	--
Nordhaus (1994)	3.0	-4.8 (-30 to 0.0)	--	--	--	--
Fankhauser (1995)	2.5	-1.4	-4.7	China	-0.7	Eastern EU and FSU
Tol (1995)	2.5	-1.9	-8.7	Africa	-0.3	
Nordhaus and Yang (1996)	2.5	-1.7	-2.1	Developing Countries	0.9	FSU
Plambeck and Hope (1996)	2.5	-2.5 (-0.05 to -11.4)	-8.6 (-0.6 to -39.5)	Asia w/o China	0 (-0.2 to 1.5)	Eastern EU and FSU
Nordhaus and Boyer (2000)	2.5	-1.5	-4.9	India	0.7	Russia
Tol (2002b)	1.0	2.3	-4.1	Africa	3.7	Western Europe
Asian Development Bank (2009)	4.2	-0.6 (average annual basis in 2100)	-2.2 market impacts -5.7 +non-market -6.7 + cat. events (average annual basis in 2100)	Indonesia, Philippines, Thailand, Vietnam	--	--
Roson and Van der Mensbruegghe (2012)	4.8	-4.6	-12.5	East Asia (w/o China and Japan)	2.1	FSU
Bosello <i>et al.</i> (2012)	2.0	-0.5	-3.2	South Asia	0.7	FSU
Bosello <i>et al.</i> (2014)	2.5	-0.6	-4.2	India	0.7	FSU
Dellink <i>et al.</i> (2019)	2.5	-2.0	-4.3	India	1.1	Russia

Source: Our adaptation from the quoted studies.

4.3. Marginal cost estimates

The information provided by the previous assessments constitutes also the basis to estimate the social cost of carbon (SCC). During the last decades, several values have been proposed and have been constantly revised. Probably, the most comprehensive overview of this evolution is offered by Tol (2018). The author surveys around 114 studies published from 1982 to 2015 reporting a total of 1231 estimates.

Considering a 3% pure rate of time preference, the mode of these studies reports a damage of \$28 per ton of carbon and a mean of \$44 per ton of carbon (Tol, 2018).

The estimates of SCC magnify the role of subjective elements in the evaluation. The main drivers of differences across estimates are the assumptions on the discount factor or on the equity weights applied to account for distributional concerns. This issue was well exemplified in the recent past by the debate accompanying the release of the Stern Review (Stern, 2006; Tol and Yohe 2006, 2007; Weitzmann, 2007). In particular, critiques on the high-damage estimates reported by Stern i.e. the «5% of global GDP each year, now and forever [...] to 20% of GDP or more» and the corresponding high marginal cost of emissions, 314 \$ per tons of carbon – were indeed largely determined by the very low pure rate of time preference and the long time period (200 years) considered in the study.

All this said, the literature, and the practice, show some tendency to use values higher than that mean of studies and to progressively update upward the estimates of the SCC (Wang *et al.*, 2019). Some examples of this trend follow. On its more recent study, Nordhaus (2017) increases its DICE model calibration of the SCC for the year 2015 to a value of \$79 per ton of CO₂ (in 2010 US\$), for a discount rate of 3%. Howard and Sterner (2017) use a damage function in their DICE-2013R model that computes a SCC that is up to four-fold the SCC estimate produced by the original DICE model. Pindyck, one of the authors more critical against the modelling approach to climate change impact assessment (Pindyck 2013, 2017), considering experts opinions as a more reliable source of information, eventually finds that among those experts expressing the higher degree of confidence, the estimated SCC ranges in the interval \$80-100. Moore *et al.* (2017) show that incorporating the most recent estimates of damage functions for the agricultural sector into the FUND integrated assessment model would double the SCC.⁴ Ricke *et al.* (2018), combining more recent climate model projections, social economic projections and economic estimates of damages identify a median of \$417 tCO₂ for the SCC that results also unequally distributed across countries. Larger losses are incurred by India, China, Saudi Arabia, and also the United States.

5. DISCUSSION

By looking at the range of results presented by the different study categories it is possible to identify some robust findings.

⁴ To this prudential attitude surely contributes the structural risk and uncertainty of climate change impacts that can originate low probability catastrophic events. In a series of papers, Weitzman (2007, 2009a,b, 2010), showed that some forms of interaction between declining probability and increasing damages can increase the willingness to pay to avoid the damages (i.e., to mitigate) nominally to infinite. In this uncertain and catastrophic environment, the standard cost-benefit analyses performed by integrated assessment models, and their prescriptions are considered inadequate.

Firstly, it emerges that model-based studies, econometric approaches, enumerative methods and expert elicitation find qualitatively similar results on the cost of climate change. In particular, they agree on the non-linearity in temperature pattern of economic impacts and their uneven distribution across countries, with developing regions more exposed and vulnerable to negative climate change effects than developed areas. However, quantitative estimates differ greatly within and between approaches. Econometric studies tend to find higher damages, especially for a temperature increase in the range of 1°C to 2°C than model estimates, especially CGE based. More specifically and according to cross-sectional evidence, per capita income could fall up to 8.5% with 1°C additional increase in temperature. Model-based approaches, on the contrary, report losses often lower than 1% of world GDP for similar temperatures, with some studies reporting slight gains.

What originates such differences?

The first remark regards the inclusion of adaptation in the damage estimates. All approaches could do this to some extent but in different ways. CGE models do this by construction. More specifically, they have been explicitly built to capture market adjustments triggered by shocks that perturb price signals. They thus account for market-driven adaptation mechanisms, i.e. changes in firms and households demand and supply decisions in response to changing prices. These adjustments are, however, typically instantaneous and friction/cost less. The optimism of CGE models in factoring adaptation has indeed been indicated as a shortcoming and one of the reasons for the low estimates of climate change costs (Patt *et al.*, 2010). Econometric approaches could be better equipped than CGE models to account for the many frictions in autonomous and planned adaptation processes, because these are implicitly part of the data scrutinized. This is thus a potential explanation of the higher damage estimates by econometric studies. There is then an extended literature that discusses how different econometric approaches can account for adaptation (for an extensive discussion see Auffhammer, 2018). Namely, cross sectional approaches appear to be ill suited to capture long-term adaptation, but only short-term one.⁵ Differently panel approaches, can account for long-term adaptation applying appropriate techniques (e.g. including polynomial specification of the explanatory climate variables or resorting to a «long differencing» approach⁶). This thus can explain why, for instance, cross sectional data tend to provide larger estimates of climate change economic damages than panel estimates.

⁵ For completeness of the treatment, it is worth mentioning that if the omission of long-run adaptation may bias upward estimates of macroeconomic cost of climate change in cross sectional analyses, the short-term adaptation they consider is anyway assumed to be costless, which, on its turn can bias downward the cost estimates. This has been shown for instance in the context of Ricardian analyses (Quiggin and Horowitz, 1999).

⁶ For instance, Burke and Emerick (2016) suggest to regress the difference between five year moving averages of the dependent variable (e.g. crop yields) over a sufficient time (e.g. two decades apart), on five year moving averages of the weather/climate explanatory variable (e.g. temperature) also two decades apart, all measured in areas showing sufficient climate variation, to account for long-run adaptation.

The second remark to explain differences in evaluation is related to which impacts are considered. CGE models, even though able to examine many impact areas (see e.g. Eboli *et al.*, 2010, Ciscar *et al.*, 2018, Dellink *et al.*, 2019), cannot include all impacts. In particular, CGE models, whose economic assessments are based upon observable market transactions, encounter the largest difficulties in measuring non-market losses due for instance to ecosystem and biodiversity, but also health deterioration. Therefore, these impacts are not usually part of the economic estimation, even though, in the practice, they could be added on top of the losses computed by the CGE models, once they have been quantified with other methodologies (see e.g., Ciscar *et al.*, 2018).

The economic evaluation of extreme events/disaster losses is also challenging. Typically, CGE models account for extreme events or disasters increasing expected annual losses (in assets, land etc.). Therefore, on the one hand, they span overtime losses that in reality happen in one year. On the other hand, the evaluation remains deterministic missing to include elements like uncertainty and risk aversion that can have non-negligible effects on damage evaluation. Both issues thus contribute to underestimating losses estimates.

On the contrary, these aspects can be better captured by econometric approaches (in principle) as long as they influence the dependent variable (e.g. GDP loss) one wants to explain. Naturally, also econometrics finds it difficult to include catastrophic (not extreme) impacts linked to the existence of climate tipping points. These are low probability events that can provoke sudden or abrupt changes triggering economic losses of a totally different order of magnitude (see e.g. Lenton *et al.*, 2008 for examples and quantification). The economic consequences of these events are hardly captured by econometric studies because they have not been observed in the historical period that provides the data for the estimations.

These events can be more easily included by enumerative approaches and be duly incorporated in the educated opinions elicited from experts. The inclusion of these elements obviously contributes to increasing the estimate of economic losses from climate change.

6. CONCLUSIONS

In roughly 30 years of research, the literature on the economic assessment of climate change impacts expanded greatly. And so did methodologies: integrated assessment models became progressively more elaborated; soft linked approaches produced increasingly complex coupled modelling frameworks; econometric techniques were innovatively applied to investigate the relationship between temperature change and economic performance.

All this literature produced a wide spectrum of estimates. In this huge variety, some results are robust across studies and methodologies. There is a consolidated agreement that while there could be some economic benefits for global temperature

increases below 1°C, higher temperatures will produce net GDP losses. However, at this point, estimates diverge. Losses can be considerably high, larger than 10% of world GDP, already for a relatively low level of warming between 1 and 1.5°C according to econometric assessments. In the same range of temperature, GDP or welfare costs stay relatively low, below 1%, according to model-based assessments. Semi-quantitative assessments based upon expert elicitation are somehow in between.

The difference in results can be imputed to the very different nature of the investigation approaches. In particular, econometrics should be able to capture, by construction, all the frictions and imperfections that are part of the historical experience, while modelling approaches need to do that explicitly. Accordingly, limits in autonomous adaptation, non-market losses, and irreversibility, for instance, are difficult to capture with models. At the same time, models are able to depict, track and explain complex decision processes and economic dynamics that econometric fails to capture.

This suggests the first path for future research: econometric approaches can increasingly support the parameterization if not the choice of the functional form of behavioural equations in models to improve their empirical foundations. This can be easier in integrated assessment models, where the use of reduced-form equations is extended. It will be more challenging in other types of economic models like, for instance, CGE.

The choice of the discount rate and of the equity weighting process remains a field of unsettled debate. These factors play a paramount role in determining the results, especially of integrated assessment models. However, being these choices subjective, the only recommendation can be that of transparency of the assumptions.

All this said, there seems to be a recent tendency in the modelling literature to revise upward the estimates of the cost of climate change and of the social cost of carbon and thus to reduce the gap with econometric estimates.

The other widespread agreement across methodologies is on the huge adverse distributional implications of climate change impacts. This has either a spatial dimension – climate change increases inequality between regions – or a social dimension – climate change increases inequality between rich and poor within a country, a region, a city, a community. This highlights the second line of research: macroeconomic assessments, irrespective of the methodology, should improve their ability to go finer spatially and to explicitly account for income stratification. Some promising advancements in these directions are already available. Some econometric research is already exploiting the increasing availability of social-economic data with a high spatial resolution to produce gridded global maps of climate change impacts on economic performance. IAMs are starting to apply downscaling techniques to derive «high granularity spatially explicit» damage functions and emphasize sub-national differences.

To highlight some further areas for future investigation of macroeconomic climate change impact assessment, it is finally worth stressing that there are still im-

pacts, as well as important factors influencing them, that are largely unexplored. Among the first are: water resources, transport, migration, ecosystem and biodiversity, conflicts (Tol, 2018); few attempts have been also undertaken to study the economics of climatic and social-economic tipping points; among the second, for instance, the role of institutions, behaviour, gender. It must be recognized that many of these are difficult to be implemented into a comprehensive macroeconomic assessment and in cost-benefit analysis (see Dietz *et al.*, 2018, for an extensive discussion of possible benefits and costs of some of those impacts). However, this should not prevent from trying to account for them and to provide a wider and more complete macroeconomic assessment of climate change.

All this said, despite the challenges still pending and unresolved uncertainties, the macroeconomic assessments of climate change have provided and are still providing useful insights. Policy-making can be informed of non-trivial economic reactions triggered by climate impacts and policies. The general public can be supported in framing correctly the social dimension of the climate change problem, gaining awareness of its implications and of the necessary measures to take in order to deal with it.

REFERENCES

- ARENT, D.; TOL, R.S.J.; FAUST, E.; HELLA, J.P.; KUMAR, S.; STRZEPEK, K.M.; TOTH, F.L.; YAN, D. (2014): «Key economic sectors and services», in *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*, ed. C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, and L. L. White, 659–708. Cambridge: Cambridge University Press.
- AGRAWALA, S.; BOSELLO, F.; CARRARO, C.; DE BRUIN, K.; DE CIAN, E.; DELLINK, R.; LANZI, E. (2011): «Plan or react? Analysis of adaptation costs and benefits using Integrated Assessment Models», *Climate Change Economics*, 2(3): 175–208.
- ANTHOFF, D.; TOL, R. S. J.; YOHE, G.W. (2009): «Risk aversion, time preference, and the social cost of carbon», *Environmental Research Letters*, 4(2).
- AUFFHAMMER, M. (2018): «Quantifying Economic Damages from Climate Change», *The Journal of Economic Perspectives*, 32(4): 33–52.
- ASIAN DEVELOPMENT BANK (ADB) (2009): «The Economics of Climate Change in Southeast Asia: A Regional Review». Manila: ADB.
- BOSELLO, F. (2014): «The role of economic modelling for climate change mitigation and adaptation strategies», in A. Markandya, I. Galaraga, E. Sainz de Murieta (eds.) *Routledge Handbook of the Economics of Climate Change Adaptation*, Routledge, Oxon and New York-Bosello F.
- BOSELLO, F.; CARRARO C.; DE CIAN, E. (2013): «Adaptation can help mitigation: an integrated approach to post 2012 climate policy», *Environment and Development Economics*, 18: 270–290.
- BOSELLO, F.; NICHOLLS, R.J.; RICHARDS, J.; ROSSON, R.; TOL, R.S.J. (2012): «Economic impacts of climate change in Europe: sea-level rise», *Climatic Change*, 112(1): 63–81.

- BOSELLO, F.; PARRADO, R. (2014): «Climate change impacts and market driven adaptation: the costs of inaction including market rigidities», *FEEM Working Paper*, No. 64.2014
- BOSETTI, V.; CARRARO, C.; GALEOTTI, M.; MASSETTI, E.; TAVONI, M. (2006): «A World Induced Technical Change Hybrid Model», *The Energy Journal* SI2006 (01).
- BRETSCHGER, L.; VALENTE, S. (2011): «Climate change and uneven development», *Scandinavian Journal of Economics*, 113(4):825-45.
- BURKE, M.; EMERICK, K. (2016): «Adaptation to Climate Change: Evidence from US Agriculture», *American Economic Journal: Economic Policy*, 8(3): 106-40.
- BURKE, M.; HSIANG, S.M.; MIGUEL, E. (2015): «Global Non-Linear Effect of Temperature on Economic Production», *Nature*, 527(7577): 235-39.
- CARLETON, T.A.; HSIANG, S.M. (2016): «Social and economic impacts of climate», *Science*, 353(6304).
- CISCAR, J.C.; IBARRETA, D.; SORIA, A.; DOSIO, A.; TORETI, A.; CEGLAR, A.; FUMAGALLI, D.; DENTENER, F.; LECERF, R.; ZUCCHINI, A.; PANARELLO, L.; NIEMEYER, S.; PÉREZ-DOMÍNGUEZ, I.; FELLMANN, T.; KITOUS, A.; DESPRÉS, J.; CHRISTODOULOU, A.; DEMIREL, H.; ALFIERI, L.; DOTTORI, F.; VOUSDOKAS, M.I.; MENTASCHI, L.; VOUKOUVALAS, E.; CAMMALLERI, C.; BARBOSA, P.; MICALE, F.; VOGT, J.V.; BARREDO, J.I.; CAUDULLO, G.; MAURI, A.; DE RIGO, D.; LIBERTÀ, G.; HOUSTON DURRANT, T.; ARTÉS VIVANCOS, T.; SAN-MIGUEL-AYANZ, J.; GOSLING, S.N.; ZHERPOUR, J.; DE ROO, A.; BISSELINK, B.; BERNHARD, J.; BIANCHI, L.; ROZSAI, M.; SZEWCZYK, W.; MONGELLI, I.; FEYEN, L. (2018): «Climate impacts in Europe: Final report of the JRC PESETA III project», *EUR 29427 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg*, ISBN 978-92-79-97218-8, doi:10.2760/93257, JRC112769.
- DARWIN, R. (2004): «Effects of Greenhouse Gas Emissions on World Agriculture, Food Consumption, and Economic Welfare», *Climatic Change*, 66(1): 191-238.
- DE BRUIN, K.C.; DELLINK, R.B.; TOL, R.S.J. (2009): «AD-DICE: an implementation of adaptation in the DICE model», *Climatic Change*, 95: 63-81.
- DELL, M.; JONES, B.F.; OLKEN, B.A. (2012): «Temperature Shocks and Economic Growth: Evidence from the Last Half Century», *American Economic Journal: Macroeconomics*, 4(3): 66-95.
- DELLINK, R.; LANZI, E.; CHATEAU, J. (2019): «The Sectoral and Regional Economic Consequences of Climate Change to 2060», *Environmental and Resource Economics*, 72(2), 309-363.
- DIETZ, S.; BOWEN, A.; DIXON, C.; GRADWELL, P. (2016): «Climate value at risk' of global financial assets», *Nature Climate Change*, 6(7), 676-679.
- DIETZ, S.; BOWEN, A.; DODA, B.; GAMBHIR, A.; WARREN, R. (2018): «The Economics of 1.5°C Climate Change», *Annual Review of Environment and Resources* 2018, 43:1, 455-480.
- DIFFENBAUGH, N.S.; BURKE, M. (2019): «Global warming has increased global economic inequality», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(20), 9808-9813.
- EBOLI, F.; PARRADO, R.; ROSON, R. (2010): «Climate- change feedback on economic growth: explorations with a dynamic general equilibrium model», *Environment and Development Economics*, 15(5):515-33.
- FANKHAUSER, S. (1995): «Valuing climate change. The economics of the greenhouse», *Earthscan*, London.
- FANKHAUSER, S.; TOL, R.S.J. (2005): «On climate change and economic growth», *Resource and Energy Economics*, 27(1):1-17.
- HALLEGATTE, S. (2005): «The long-time scales of the climate-economy feedback and the climatic cost of growth», *Environmental Modelling and Assessment*, 10(4):227-89.
- HOWARD, P.H.; STERNER, T. (2017): «Few and Not So Far Between: A Meta-analysis of Climate Damage Estimates», *Environmental and Resource Economics*, 68(1), 197-225. <https://doi.org/10.1007/s10640-017-0166-z>
- KAHN, M.E.; MOHADDES, K.; RYAN N.C. NG; PESARAN, M.H.; RAISSI, M.; YANG, J.C. (2019): «Long-Term Macroeconomic Effects of Climate Change: A Cross-Country Analysis», *Federal Reserve Bank of Dallas, Globalization Institute Working Papers*, 2019(365). <https://doi.org/10.24149/gwp365>

- KAINUMA, M.; MATSUOKA, Y.; MORITA, T. (2003): (Eds.) «Climate Policy Assessment Asia-Pacific Integrated Modeling», Springer-Verlag.
- KNIGHT, F.H. (1921): «Risk, uncertainty, and profit». Hart, Schaffner & Marx; Houghton Mifflin Company, Boston.
- KRIEGLER, E.; HALL, J.W.; HELD, H.; DAWSON, R.; SCHELLNHUBER, H.J. (2009): «Imprecise probability assessment of tipping points in the climate system», *PNAS*, 106 (13), 5041-5046
- IPCC, (2014), Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- LEMOINE, D.; KAPNICK, S. (2016): «A top-down approach to projecting market impacts of climate change», *Nature Climate Change*, 6(1):51-55.
- LENTON, T.M.; HELD, H.; KRIEGLER, E.; HALL, J.W.; LUCHT, W.; RAHMSTORF, S.; SCHELLNHUBER, H.J. (2008): «Tipping elements in the Earth's climate system», *PNAS*, 105 (6), 1786-1793.
- MOORE, F.C.; BALDOS, U.; HERTEL, T., *et al.* (2017): «New science of climate change impacts on agriculture implies higher social cost of carbon», *Nature Communications*, 8:1607.
- NEWBOLD S.C.; MARTEN A.L. (2014): «The value of information for integrated assessment models of climate change». *Journal of Environmental Economics and Management* 68(1):111-123.
- NORDHAUS, W.D. (1994): «Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change». Cambridge: The MIT Press.
- (2007): «A Review of the Stern Review in Climate Change», *Journal of Economic Literature*, XLV(September), 686-702.
- (2013): «The Climate Casino: Risk, Uncertainty and Economics for a Warming World». New Haven - London, Yale University Press, 2013, 378 pp.
- (2017): «Revisiting the social cost of carbon». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(7), 1518-1523. <https://doi.org/10.1073/pnas.1609244114>
- NORDHAUS, W.D.; YANG, Z. (1996): «A Regional Dynamic General-Equilibrium Model of Alternative Climate-Change Strategies», *American Economic Review*, 86 (4), pp. 741-765.
- NORDHAUS, W.D.; BOYER, J.G. (2000): «Warming the World: Economic Models of Global Warming». Cambridge, Massachusetts - London, England: The MIT Press.
- PATT, A.G.; VAN VUUREN D.; BERKHOUT, F.; AAHEIM, A.; HOF, A.F.; ISAAC, M.; MECHLER, M. (2010): «Adaptation in integrated assessment modelling, where do we stand?», *Climatic Change*, 99: 383-402.
- PEARCE, D.W.; CLINE, W.R.; ACHANTA, A.; FANKHAUSER, S.; PACHAURI, R.K.; TOL, R.S.J.; VELLINGA, P. (1996): «The social cost of climate change: greenhouse damage and the benefits of control», in J. Bruce, H. Lee, and E. Haites (eds), *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change*, Cambridge: Cambridge University Press, pp. 179-224.
- PINDYCK, R.S. (2013): «Climate Change Policy: What Do the Models Tell Us?». *Journal of Economic Literature*, 51(3), 860-872.
- (2017): «The Use and Misuse of Models for Climate Policy», *Review of Environmental Economics and Policy*, vol 11(1), 100-114.
- (2019): «The social cost of carbon revisited», *Journal of Environmental Economics and Management*, 94, 140-160.
- PLAMBECK, E.L.; HOPE, C.W. (1996): «PAGE95 - An Updated Valuation of the Impacts of Global Warming», *Energy Policy*, 24(9):783-93.
- QUIGGIN, J.; HOROWITZ, J.K. (1999): «The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis: Comment», *American Economic Review*, 89(4), 1044-45.
- RIAH, K.; VAN VUUREN, D.P.; KRIEGLER, E.; EDMONDS, J.; O'NEILL, B.C.; FUJIMORI, S.; TAVONI, M., *et al.* (2017): «The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview», *Global Environmental Change*, 42, 153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- RICKE, K.; DROUET, L.; CALDEIRA, K.; TAVONI, M. (2018): «Country-level social cost of carbon», *Nature Climate Change* 8, 895-900.

- ROSON, R.; VAN DER MENSBRUEGGHE, D. (2012): «Climate change and economic growth: impacts and interactions», *International Journal of Sustainable Economy*, Inderscience Enterprises Ltd, vol. 4(3), pages 270-285.
- SANSTAD, A.H.; GREENING, L.A. (1998): «Economic models for climate policy analysis: A critical discussion», *Environmental Modeling & Assessment* 3: 3-18.
- SATHAYE, J.; SHUKLA, P.R. (2013): «Methods and Models for Costing Carbon Mitigation». (October 2013). *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 38, pp. 137-168, 2013.
- STEHFEST, E.; VAN VUUREN, D.; KRAM, T.; BOUWMAN, L.; ALKEMADE, R.; BAKKENES, M.; BIEMANS, H.; BOUWMAN, A.; DEN ELZEN, M.; JANSE, J.; LUCAS, P.; VAN MINNEN, J.; MÜLLER, C.; PRINS, A. (2014): «Integrated Assessment of Global Environmental Change with IMAGE 3.0. Model description and policy applications», The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.
- STERN, N.H.; PETERS, S.; BAKHSKI, V.; BOWEN, A.; CAMERON, C.; CATOVSKY, S.; CRANE, D.; CRUICKSHANK, S.; DIETZ, S.; EDMONDSON, N.; GARBETT, S.-L.; HAMID, L.; HOFFMAN, G.; INGRAM, D.; JONES, B.; PATMORE, N.; RADCLIFFE, H.; SATHIYARAJAH, R.; STOCK, M.; TAYLOR, C.; VERNON, T.; WANJIE, H.; ZENGHELIS, D. (2006): *Stern Review: The Economics of Climate Change*. London: Her Majesty's Treasury. Sterner.
- TOL, R.S.J. (1995): «The Damage Costs of Climate Change Toward More Comprehensive Calculations». *Environmental and Resource Economics* 5(4):353-74.
- (2002a): «Estimates of the damage costs of climate change, Part I: benchmark estimates», *Environmental and Resource Economics*, 21 (1), 47-73.
- (2002b): «Estimates of the damage costs of climate change: Part II. dynamic estimates», *Environmental and Resource Economics*, 21 (1), 135-160.
- (2006): «Multi-Gas Emission Reduction for Climate Change Policy: An Application of FUND», *Energy Journal*, 27, 235-250.
- (2009): «The economic effects of climate change», *Journal of Economic Perspectives*, 23(2):29-51.
- (2018): «The Economic Impacts of Climate Change», 12(1), 4-25. <https://doi.org/10.1093/reep/rex027>
- WANG P.; DENG, X.; ZHOU, H.; YU, S. (2019): «Estimates of the social cost of carbon: A review based on meta-analysis», *Journal of Cleaner Production*, 209: 1494-1507.
- WEITZMAN, M.L. (2007): «A review of the Stern review on the economics of climate change», *Journal of Economic Literature*, 45 (3):703-724.
- (2009a): «On modeling and interpreting the economics of catastrophic climate change», *Review of Economics and Statistics*, 2009, vol. 91 (pg. 1-19).
- (2009b): «Additive damages, fat-tailed climate dynamics, and uncertain discounting», *Economics: The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, 2009, vol. 3 (pg. 1-29).
- (2010): «Risk-Adjusted Gamma Discounting», *Journal of Environmental Economics and Management*, 2010, vol. 60 (pg. 1-13).

Portfolio analysis as a means of managing uncertainties in climate change adaptation: some initial reflections

In order to counteract the challenge of climate uncertainties in investment planning, Portfolio Analysis (PA) aggregates diverse adaptation measures in different portfolios. Thus, instead of considering a single intervention, it attempts to identify the best portfolios according to their performance in relation to economic efficiency as well as risk (variance of the economic performance over different scenarios). However, whilst PA is recognised as having the potential for bringing about a more holistic economic analysis of adaptation, it remains rarely used. Our assessment of the key strengths and limitations of PA suggests that wider adoption of a portfolio approach will primarily depend on stakeholder recognition that by being selective about the numbers and composition of portfolios considered, data and analytical capacity constraints can be overcome.

Con el fin de contrarrestar el reto de las incertidumbres climáticas en la planificación de inversiones, el Análisis de Cartera (AC) agrupa diversas medidas de adaptación en diferentes áreas. Así, en lugar de considerar una única intervención, la AC procura identificar las mejores carteras de acuerdo a su rendimiento en eficiencia económica y riesgo (variación del rendimiento económico en diferentes escenarios). Sin embargo, pese al potencial de la AC en lograr un análisis económico de adaptación más holístico, rara vez se utiliza. Nuestra evaluación sobre las fortalezas y limitaciones de la AC sugiere que una adopción más amplia en el enfoque de carteras dependerá principalmente de las exigencias de los interesados, dado que su criterio sobre el número y la composición de las carteras puede solventar las limitaciones de datos y la capacidad analítica.

Inbertsioen plangintza burutzean, klima-ziurgabetasunak dakarren erronkari aurre egin nahian, ikusi dugu Zorroaren Analisiak (ZA) hainbat egokitzapen-neurri gehitzen dituela hainbat arlotan. Beraz, esku-hartze bakar bat kontuan hartu beharrean, zorrerik onenak identifikatzen saiatzen da ZA, kontuan hartuta zer errendimendu duten eraginkortasun ekonomikoari eta arriskuari dagokienez (errendimendu ekonomikoaren bariantza hainbat egoeratan). Hala ere, ZAri egokitzapenaren analisi ekonomiko holistikoa lortzeko gaitasuna duela aitortzen bazaio ere, oso gutxitan erabiltzen da. ZAren indargunei eta funtsezko mugei egin diegun ebaluazioak iradokitzen du zorroaren ikuspegi zabalago bat izatea interesdunen errekonozimenduaren gora-beheran geratzen dela nagusiki; izan ere, aztertutako zorroen zenbakiekin eta osarearekin selektiboak izanez, datuen mugak eta gaitasun analitikoa gainditu daitezke.

Alistair Hunt

Department of Economics, University of Bath, UK

Filippo Frascini

Catholic University, Milan

Table of contents

1. Introduction
2. Modern Portfolio Theory, the theoretical framework
3. Essential milestones of the Modern Portfolio Theory
4. Portfolio analysis in practice
5. Conclusions

References

Keywords: portfolio analysis, economic assessment, uncertainty.

Palabras clave: análisis de cartera, evaluación económica, incertidumbre.

JEL codes: G11, Q51, Q56

Fecha de entrada: 2020/05/11

Fecha de aceptación: 2020/05/27

1. INTRODUCTION

Adaptation measures are a challenging duty and they have to deal with the deep uncertainty which characterises the assessment of the costs of the climate change impacts and the benefits of adaptation options. The definition of effective adaptation policies thus requires the knowledge and use of new decision methods and criteria able to deal with an uncertainty called Knightian (Knight, 1933), due to the impossibility to characterise it with an objective probability distribution. Several decision tools (e.g. the Robust Decision Making and the Real Option Analysis) and new decision-making processes (such as the Iterative Risk Management or the Adaptation Pathways Approach) have been assessed in the scientific literature. These approaches have been widely assessed and described by the scientific literature.

This paper focuses instead on the Modern Portfolio Theory (MPT), another promising tool, which, despite originating from the financial sector, helps the decision-maker in identifying a set of possible climate adaptation investment solutions, including the estimate of the returns of the policies and their variability in relation to a set of possible scenarios. The decision-maker can thus aggregate diverse measures with the aim to reduce the risk connected to their performances in the future, taking ad-

vantage of an important property of the portfolio theory: the economic returns of the assets are additive, while risks partially cancel each other out (Markowitz 1952, 1956).

This paper thus discusses the main steps of the MPT methodology, reviewing and evaluating concrete applications in the field of the natural resource management and the climate change related investments. The essential goal of the paper is to identify the key strengths and weaknesses of this instrument for the definition of effective adaptation policies, reducing the variance of the return against different climate scenarios, and adequately communicating to local and wider stakeholders the risks connected with badly constructed climate change adaptation policies. This paper therefore focuses only on the essential elements of MPT, largely ignoring the data-intensive developments in the method that continue in financial market applications. Climate change uncertainty and the alternative decision support methods.

Climate change adaptation policies have been recognised as a key issue of the global development policies. They were inserted among the 17 Sustainable Development Goals (2015) with a dedicated goal: «Take urgent action to combat climate change and its impact». The Paris Agreement (2015) stated that there is a «need for an effective and progressive response to the urgent threat of climate change» and that there is an «intrinsic relationship that climate change actions, responses and impacts have with equitable access to sustainable development and eradication of poverty». Climate change is also a pillar and a cross-cutting topic of the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction: «disasters, many of which are exacerbated by climate change and which are increasing in frequency and intensity, significantly impede progress towards sustainable development» (UNISDR, 2015).

Besides these global commitments, the public administrations also produced strategies and plans, with the aim to identify the expected impacts of climate change, the adaptation objectives and a series of adaptation measures. In the European Union, (EU), 28 European countries – 25 EU member states and 3 European Economic Area (EEA) states – have adopted a national adaptation strategy; whereas 17 of them – 15 EU states and 2 EEA states – have also developed a plan (EU, 2017). National Adaptation Programmes of Action (NAPAs) were created at Cop 7 (2001) in Marrakesh for the specific and urgent needs of the Least Developed Countries, whereas the Cancun Adaptation Framework (2010) instituted the National Adaptation Plans (NAPs)¹, with the goal to develop a more comprehensive adaptation process, with a medium and long-term approach to reduce the vulnerability to the adverse effects of climate change.

However, despite the presence of a plurality of political commitments, there is an uneven implementation of adaptation measures, as their monitoring is particularly complex because of the thin differences between the common development policies and the adaptation policies (Schipper, 2007). However, some reviews were

¹ 13 plans (data updated at October 2019) have been submitted since the 2015 (Brazil, Burkina Faso, Cameroon, Chile, Colombia, Ethiopia, Fiji, Kenya, Saint Lucia, Sri Lanka, the State of Palestine, Sudan, Togo).

developed (Ford *et al.*, 2011; Ford *et al.*, 2015; Lesnikowski *et al.*, 2015) showing the lack of a straightforward and effective implementation of adaptation policies. Three main obstacles emerge in the scientific literature: i) The presence of conflicting definitions about adaptation and a complex theoretical framework (Fankhauser, 2017; Hall, 2017; Schipper, 2007); ii) The existence of adaptation barriers (e.g. lack of economic resources, institutional failures, conflicting values) and limits (e.g. physical limits to migrations) (IPCC, 2014; Adger *et al.*, 2013; Moser *et al.*, 2010); iii) The uncertainty connected to the economic evaluation of the local impacts of climate change and of the benefits of the adaptation measures (Wilby and Dessai, 2010; Heal and Millner, 2014; Hallegatte *et al.*, 2012; Pindyck, 2007)². This last obstacle is perhaps most important since it can hamper the design and the development of adequate adaptation policies. Lack of knowledge about the costs and benefits of the climate change impacts and of the adaptation options available limits the ability of traditional decision support tools (such as the Cost-Benefit Analysis and the Cost-Effectiveness Analysis) in identifying effective policy solutions.

The scientific literature has highlighted the possibility to use alternative decision support tools or decision-making processes, that are able to integrate climate change risk into economic analysis or into the decision-making process, including real options analysis (ROA) and robust decision-making (RDM). Watkiss *et al.* (2015) and Dittrich *et al.* (2016) conducted reviews about these new decision methods, focusing both on decision-making processes and decision support tools. Portfolio Analysis is one of these instruments, as it can help public or private decision-makers in identifying portfolios of measures which can be effective over a wide range of possible futures, limiting the variance of the return of the investment. MPT could be effective even for the communication of the uncertainty connected to climate change, especially by informing long-term decisions that could be highly affected by climate variations. MPT can thus help decision-makers (both private and public) in planning investments in an uncertain framework, giving them the opportunity to find ways to reduce the variability of the expected outcomes, without losing economic returns.

2. MODERN PORTFOLIO THEORY, THE THEORETICAL FRAMEWORK

MPT is fundamentally based on the seminal work («Portfolio selections») of Markowitz (1952), who started systematising some key concepts. The starting point of Markowitz's research is the broadening of the idea that the goal of the investor is the maximization of the discounted expected revenues of his investment. Investment decisions are made in a context of uncertainty about the future conditions and out-

² There are four main sources of this uncertainty: uncertainty regarding the trajectory and dimensions of future greenhouse gas emissions, uncertainty regarding the sensitivity of climate to GHG emissions, uncertainty regarding the range and dimensions of uncertainty, and uncertainty relating to the costs and effectiveness of adaptation responses.

comes, therefore there is no perfect knowledge about the investment revenues. The investor surely considers the expected revenues as a desirable thing, but he looks also at the variability of this amount according to the plurality of possible futures. The aim of the investor, and the reason why he decides to diversify his investment in a portfolio, is the maximization of the expected return given his tolerance of risk. Alternatively stated, an investor seeks to minimize the risk at which he is exposed given some target expected return (Fabozzi, 2008; Aerts *et al.*, 2008; Watkiss *et al.*, 2015; Francis and Kim, 2013). For the reasons given above, MPT has been widely used in other fields beyond the financial sector: energy sector (Ringer *et al.*, 2007), fishery harvesting decisions (Alvarez *et al.*, 2017; Sanchirico *et al.*, 2008), biodiversity conservation (Figge, 2004; Koellner and Schmitz, 2006; Hoekstra, 2012), forest management (Matthies *et al.*, 2015; Knoke *et al.*, 2005; Knoke, 2008), agriculture (Castro *et al.*, 2015; Niggol Seo, 2010), water resource management (Marinoni *et al.*, 2011), invasive pest and disease surveillance (Yemshanov *et al.*, 2014), spatial planning (Hills *et al.*, 2009; Halpern *et al.*, 2011) and natural resource conservation under climate uncertainty (Crowe and Parker, 2008; Ando and Mallory, 2012; Mallory and Ando, 2014). Scientific research in ecology have also recognised an effect of the diversification, like in the portfolio management, in natural systems, by which communities with high diversity tend to produce more stable streams of ecosystem services (Alvarez *et al.*, 2017).

Due to the presence of a significant uncertainty connected to the climate change impacts and the difficulties in reducing them in the future, MPT can be particularly useful for the climate change decisions, giving the opportunity to guide public decision-makers in facing this exceptionally complex framework.

3. ESSENTIAL MILESTONES OF THE MODERN PORTFOLIO THEORY

Although MPT is fundamentally based on the economic principles of the Cost Benefit Analysis and on the economic efficiency criteria, it makes use of a phenomenon which is observed in the formation of stock portfolios: returns are additive, while risks partially cancel each other out (Markowitz 1952, 1956). MPT leads to the identification of portfolios of measures and it gives the opportunity to identify investment solutions that are recommended to the decision-makers for their adaptation objectives. These portfolios are selected on the basis of two main decision criteria: i) the economic return of the investment (usually, the Expected Net Present Value); ii) the risk connected to the investment (usually represented by the variance or standard deviation of the economic return along the various possible futures). Even though these are the two key decision rules of the portfolio analysis, the selection of the preferred investment solution could then be helped by other criteria, such as the social values and preferences assessed by stakeholder engagements, as well as wider economic effects on – for example – employment.

In this section, the methodology of the portfolio analysis is briefly described, and the key terminology and the fundamental milestones presented.

3.1. Identification of portfolio manager and assets selection

In MPT the investment decisions are structured in assets, which can be collected in various portfolios. «Assets» are usually considered securities whose value is generated from a future flow of costs and benefits. The economic return of each asset is usually called the «asset's return». A «risky asset» is an investment for which the future return is uncertain. The deciding agent, called the «portfolio manager», wants to maximise the trade-off between economic return and risk, possibly choosing the more remunerative portfolio with the lower level of risk.

MPT was initially applied in the finance sector, thus considering stocks and bonds as risky assets and portfolios as an investment with a mix of various shares of these assets. However, this tool can also be applied to other frameworks. For example, in the agriculture sector the portfolio manager will probably be the farmer and the assets might be different variety of crops or different possible land uses; whereas in the energy sector the portfolio manager, as a public government decision-maker, has to decide among various mix of alternative sources of energy available, i.e. renewable or fossil.

Thus, the first step of the portfolio analysis requires two connected tasks: i) the identification of the portfolio manager, analysing her/his targets, values and preferences; ii) the definition of the assets available to the portfolio manager. The choice of the asset is a demanding duty, since the characteristics of the securities are essential in reaching the main goal of the portfolio analysis, i.e. the reduction of the risk connected to the investment. An effective portfolio is indeed more than a list of various good stocks and bonds (Markowitz, 1991). The performance of the portfolio strictly depends on the mix of the assets considered, which have to be accurately chosen, considering the relationships between them.

Although the capacity to generate revenues is essential for a good asset, another key principle in the selection among the different options is indeed the correlation between their performances. The correlation coefficient measures how two investments vary according to the different possible futures and it spans between 1 and -1, where 1 is the perfect correlation, 0 represents an uncorrelation and -1 a perfect negative correlation. If the securities vary in the same direction and with the same proportion, the correlation between them is perfect, whereas if they vary in the opposite way, at the same proportion, they will be negatively correlated. Portfolio diversification is effective when it regards assets which are less correlated or negatively correlated, whereas when the correlation is perfect and the assets proportionally vary in the same direction, the diversification has no effects and the risk is not reduced in the portfolio. Usually securities are correlated but not perfectly correlated and therefore diversification is generally effective in reducing the risk of the investment (Markowitz, 1991).

3.2. Estimating the economic performances of the assets selected

Once the assets have been identified, their actual and expected returns should be measured. The standard literature on MPT is basically focused on financial assets

and therefore considers simple market prices and their future flows, finding a discount rate to actualise the future performances to the present. However, in recent years the use of MPT has been expanded to several other fields including land use choices and biodiversity preservation (Figge, 2004). These involve the management of public goods, thus complicating the evaluation of the benefits and costs of the measures. In some cases, indeed, benefits from natural resource management cannot easily be quantified in monetary terms, so the portfolio manager is obliged to use an alternative metric that can allow comparison of benefits (Alvarez *et al.*, 2017). As long as such a metric exists, it is possible for the MPT to be performed³.

Following the traditional economic terminology of the Cost-Benefit Analysis framework, MPT requires the calculus of the Expected Net Present Value (ENPV) of each asset, i.e. the forecasted economic return of the investment on each asset, considering the revenues in a plurality of possible futures. Probabilities are usually assigned considering the past trends of the returns of the asset and developing a future pattern in some way related to these trends (Fabozzi, 2008). However, considering the context of climate change related decisions, the definition of probabilities about the future scenarios represents a problematic aspect of the analysis. Indeed, scientific knowledge is still insufficient for assigning likelihood to each climate change scenario. Indeed, even if the scientific community accomplishes a refined and complete understanding about the functioning of the climate system and its connection to the local environments, an uncertainty about the future pattern of the greenhouse gas emissions will remain. The information learnt from historical data might indeed lead to fallacies in beliefs about alternative futures, leading to a wrong set of probabilities for each possible scenario. This is why expert personal judgments are accepted in estimating the performance of the asset classes depending on their own understanding of the factors that influence the returns on asset (the political stability, the monetary and fiscal policies, the business cycles of sectors) and what their impacts might be (Fabozzi *et al.*, 2002).

However, according to Markowitz (1952) the ENPV is not enough for the identification of the best assets. The analysis of the risk connected to the investment is the other essential step in the MPT framework and it relies on the statistical concept of variance. This measure represents the dispersion or variability of the possible outcomes around the expected value. In the case of the finance sector, variance might show the range of the possible returns of a bond or a portfolio of securities around the mean value according to different possible future economic scenarios. When the

³ In the review of Matthies *et al* (2019), they find that assets, and thereby expected returns, can be defined by some or all of the following key return components: i) access/ownership to the resource base/asset (e.g. land) i.e. where managed access is an indicator of effective biodiversity conservation; ii) biological growth component (i.e. periodic growth increment); iii) growth in the unit value of the output of the asset (i.e. transition between timber assortments); and iv) changes in total value (monetary or non-monetary) associated with the asset.

variance is 0, the investment is riskless and its outcome has no variability in the different possible future, although this situation is obviously uncommon.

Another means of representing the variability of the revenues is the standard deviation. The unit of measure of the standard deviation is the same (the variance is a square unit) and it might simplify the comprehension and discussion of the results of the analysis. Obviously, the greater the variance and the standard deviation, the bigger the risk of the investment (Markowitz, 1952; Fabozzi, 2008).

Considering a combination of two assets, the calculus of the variance is more complex, and it also depends upon the relationship between the assets. The information needed is the degree to which the economic performance of the two assets change together according to the different possible futures. In statistical terms, this is the covariance. The correlation might also be used, as it is similar to the covariance and it is estimated dividing the covariance of two assets by the product of their standard deviations. The correlation coefficient is a standardized number and it is comparable across different assets. It varies between +1.0, which represents the perfect co-movement in the same direction, and -1.0, the perfect co-movement in the opposite direction. If the correlation is 0, it means that the economic performances of the assets are uncorrelated. Thus, in the adaptation context, a value close to zero would suggest that the measures being introduced are effective over different parts of the climate risk uncertainly range.

Markowitz explains his approach to diversification as follows (Markowitz, 1952):

Not only does portfolio analysis imply diversification, it implies the «right kind» of diversification for the «right reason». The adequacy of diversification is not thought by investors to depend on the number of different securities held. A portfolio with sixty different railway securities, for example, would not be as well diversified as the same size portfolio with some railroad, some public utility, mining, various sorts of manufacturing, etc. The reason is that it is generally more likely for firms within the same industry to do poorly at the same time than for firms in dissimilar industries. Similarly, in trying to make variance [of returns] small it is not enough to invest in many securities. It is necessary to avoid investing in securities with high covariances [or correlations] among themselves.

Thus, the assets with good economic return, low variance and which have the economic performances not perfectly correlated are the ones to be selected for the portfolio analysis. In the climate change context, the assets should ideally be specialised to be effective in different scenarios: i.e. some of the adaptation policies should be perfectly suited for a no/low climate change scenario, whereas other adaptation policies should be suited for scenarios with severe climate changes (Crowe and Parker, 2008). Thanks to this diversification, the portfolio can be effective in reducing the risk of investing all the resources available in just one adaptation policy perfectly suited for just one possible future.

3.3. The aggregation of the assets in portfolios and the evaluation of their performances

The following step of the MPT methodology is the aggregation of the selected assets in portfolios. Portfolios are made up by different shares of the available assets. As well as for the single assets, when the portfolios have been identified, their expected return (or expected net present value) and variance have to be estimated. Portfolios are usually made up by a plurality of assets and the variance must include the co-variance between each couple of assets which composes the portfolio. The standard deviation (and the variance) of a portfolio basically depends indeed on three key dimensions (Markowitz, 1991):

- i) the standard deviation of each asset
- ii) the correlation between each asset
- iii) the amount of the investment assigned to each asset

Assuming the same value of standard deviation and the same amount of investment assigned to the securities, the correlation between the options is the essential value which determines the effectiveness of diversification in reducing the risk of the investment.

The mix of different assets in portfolios can thus reduce the risk connected to a single asset investment. However, there is a difference between systematic risk and unsystematic risk (Figge, 2004). The first refers to risk that equally affects all the assets of a portfolio, such as a drought for various crop plants (even if some plants are more robust to the lack of water than others). Diversification is thus ineffective on this kind of risk. The latter is instead the risk that affects the assets in different ways. A particular pest or disease can hit some crops whereas other ones could be immune. Therefore, diversification of crops in portfolios can have good effects on the reduction of the risk of disease.

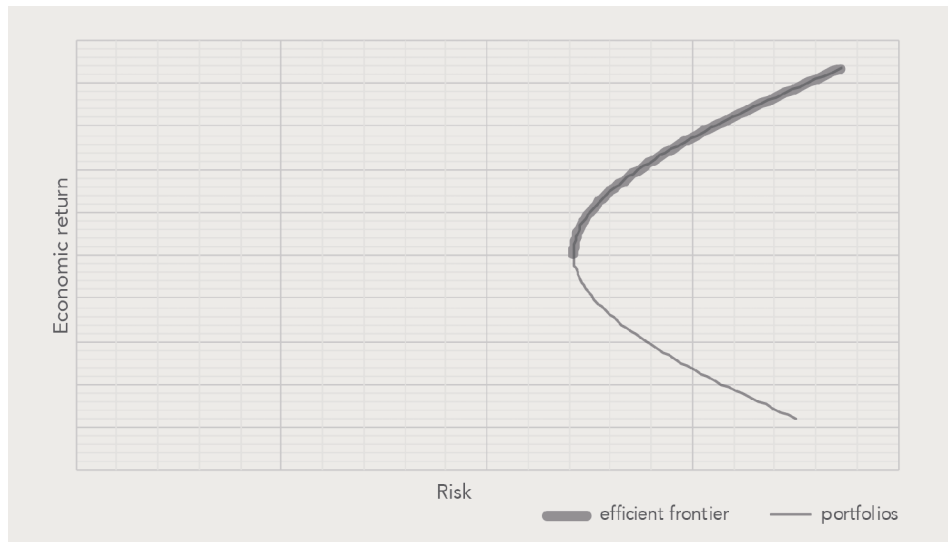
3.4. The efficient frontier

When the economic return (or the ENPV) of the portfolios and the variances of these returns have been estimated, the last two steps of the MPT regard the presentation of the results on a diagram and the selection of the optimal portfolios. MPT calls «feasible portfolio» to every portfolio that an investor can construct given the assets available. The results can be showed on a graph, having on the x-axis the values of the variance (or standard deviation) and on the y-axis the economic returns. Considering a portfolio with just two assets, all the results will fall on a line, whereas if the portfolios combine three or more assets, the portfolios will cover an area on the graph.

In Figure 1 the portfolios made by the combination of two hypothetical adaptation measures is represented. The upper and lower extremes of the curve are the two adaptation options, whereas the curve represents all the feasible portfolios originated by the combination among the two assets. The thicker part of the curve is the efficient fron-

tier, which starts in the point with the lowest standard deviation. All the investment solutions on the efficient frontier should be recommended to the decision-maker.

Figure 1. **THE EFFICIENT FRONTIER**



Source: Personal elaboration.

The efficient frontier can be considered an effective representation of the investment solutions available. Both in a private investment context or in a public decision environment, this figure could easily show the characteristics of the options available, effectively presenting the trade-off between revenues and risk.

3.5. Portfolio selection

The last step of the analysis is the choice of the optimal portfolio. Every portfolio on the efficient frontier can be considered an optimal solution. The choice depends indeed on the utility function of the investor, who also takes into account his risk attitude. If a person is faced with a decision, the alternative with the highest utility is the preferred choice. The investor's utility can be represented on an indifference curve, which collects all the combinations between economic return and risk which have the same utility for him. The grade of the curve is influenced by the attitude to risk of the investor. If the curve is more parallel with the horizontal axis, it means that she/he is risk seeking, because she/he is available to incur in a significantly higher risk of his investment even for a small increase in the economic return of his portfolio. Whereas, the more the line is vertical, the more the investor would have required a high economic return compensation for a little loss in the standard deviation. Thus, she/he is risk adverse (Boardman *et al.*, 2018).

4. PORTFOLIO ANALYSIS IN PRACTICE

The power of diversification has been widely recognized by the financial literature. However, the management of risk in an uncertain context is not just an issue of the financial market. Design of environmental, including climate change-related, policies are hampered by uncertainty, due to the presence of several unknown variables, e.g. the evolution of future climate conditions, the pattern of future human settlements, and the scientific uncertainty regarding the interaction of species. Consequently, some elements of portfolio analysis developed in the financial sector have entered in the scientific context of environmental management, with the aim of introducing interventions that are effective as well as robust to uncertainties. Recent experience is reported in the following paragraphs.

The strengths of portfolio analysis have been recognized in natural resource management and biodiversity conservation choices and in land-use decisions: it provides a means of aiding natural resource managers in their decision making by weighting returns and risks of different strategies to find the actions that optimize the provision of ecosystem service flows (Alvarez *et al.*, 2017).

A first interesting contribution of MPT to the biodiversity sector is proposed by Figge (2004). He presents the problem of the biodiversity conservation in a context where the choices of a decision-maker are constrained by a limited budget and the knowledge about the future outcomes is scarce. Figge (2004) designs a comparison between the portfolio management approach and the biodiversity conservation issue. Biodiversity is fundamentally similar to the portfolio creation, where the aggregation of different assets gives the opportunity to reduce the risk of return, not reducing the expected return of the investment. If we consider pharmaceutical purposes, the conservation of a plurality of plants could permit to preserve species that are useful for the discovery of new medicine. Figge (2004) makes a comparison between the portfolio manager and the biodiversity manager, which analogously tries to design a portfolio with an optimised risk-return ratio by optimising the mix of species, genes or ecosystems in the portfolio. Biodiversity is encouraged when there are various species mixed together, but it is determined not just by the quantity of species, genes or ecosystems, but also by the degree of diversity inside the community. The return of the biodiversity portfolio can be measured in other terms, not only using economic metrics. The expected agricultural yields could be expressed in physical terms and the return from bio-prospecting could be measured in numbers of new pharmaceutical active substances (Figge, 2004). Figge (2004) states that mixing two perfectly correlated assets will have no positive effects on the variance of the portfolio. Anyway, although some assets might be positively correlated (as the crops yields to average temperature and precipitations), they are seldomly perfectly correlated and the diversification effort is often effective. For example, the crops yields can increase or decrease depending on the climate variables, but different variety of plants have different ecological functioning and different sensitivity to temperature

and precipitations. Thus, the portfolio manager has to consider the relations between the assets and their relative weights inside the portfolio.

The performance of one asset does not, though, necessarily affect the performance of another asset of the portfolio. The species of an ecosystem are instead symbiotic; therefore, the performances of an organism have effects on the other ones in the ecosystem. Another difference from MPT in the financial sector regards the irreversibility of the decisions in the biodiversity management, where non preserving a species might lead to the extinction of that species, compromising future investments on that asset (whereas the investment in the financial market can be usually changed year by year).

Koellner and Schmitz (2006) present the concept of biodiversity as an issue of portfolio management, showing that the increased level of biodiversity can improve the yield-to-variance ratio and increase the marginal benefit of adding biodiversity to a portfolio. Yield refers not only to direct financial performance, but also to any type of service provided by ecosystems (e.g. biomass production in agriculture and forestry, carbon dioxide sequestration, flood mitigation). Risk refers to the unpredictability of future yields and is determined by the variance in space and time. Systems with many species can buffer the disturbance better than systems with fewer species, because the probability is greater that some species will be able to maintain certain level of ecosystem services, even though others may fail to function. The paper shows how the improved biodiversity can have a powerful effect in achieving better mean-variance performances. However, they point out how portfolio analysis requires a rich amount of data, starting from a deep understanding of the mean level of an ecosystem service but also its variability in time and space.

MPT has also been employed in other natural resource management fields. Some authors used the portfolio analysis in the *fishery sector*, in the attempt to find harvesting strategies that increase the revenues while reducing the variability of the catchments. Sylvia *et al.* (2003) develop optimal portfolio frontiers for the pacific whiting fishery using three alternative benefit functions representing the objectives of different interest groups (seafood brokers, seafood processors, resource managers). The analysis generates risk return frontiers for all of them, considering different mixes of fish harvested. They compare the actual mix of species caught with the optimal portfolio efficient frontier for each actor and they find that the actual portfolio is sub-optimal for every point of view considered. They state: «*a portfolio approach provides industry and resource managers with a potentially valuable framework to evaluate complex natural resources issues and develop management strategies best suited to balancing multiple objectives*».

Edwards *et al.* (2004) consider again the fishery sector, in the attempt to find more robust management strategies to the plausible expected futures. The predominant approach the governments use to regulate harvests of fish and invertebrate resources treats species in isolation from each other, the so called single-species ap-

proach. This approach, based on the maximum sustainable yield (MSY) for each species separately, has been criticised by the scientific literature (Punt and Smith, 2001)). Therefore, they recommend a portfolio approach as a conceptual model to optimally combine stocks of wild fish species that ecologically interact when jointly caught. A similar aim has been settled in the analysis made by Sanchirico *et al.* (2008). The goal of their work is the use of the portfolio theory in setting catchments level for fishery. They demonstrate that this strategy can improve the yield while diminishing the variance of the fish available. The urgency of this new approach comes from the collapse of some fish stocks in the previous years. They considered the Ecosystem-based fishery management (EBFM) which requires recognition of system component interactions in determining management targets. Thus, they define an efficient frontier with different mixes of total available catches (TACs) for each species, considering the natural relations among them.

Further, MPT has been used for decisions regarding to investments in the *forest sector*. Knoke *et al.* (2005) develop a portfolio analysis with the aim to identify the better share of different tree species looking at their economic performance and its variability. Historically, in this sector, classical economic calculus leads to a superiority of the profitability of single species coniferous forest management. However, Knoke *et al.* (2005) state that this strategy conducts to an increase of the vulnerability of the forests and a variability of the revenues, due to the loss of biodiversity and a severe reduction in the resistance against storm, snow, ice, drought and insects damage of the forest stands. Moreover, growing trees is an extremely long-term investment in central Europe. Production times of 100 years and more are common and during its lifetime there are several risks that can considerably reduce the expected yields. This is why an investment in this field should be carefully planned, considering also that making changes to the investment during the lifetime of the forest is quite complex and, thus, the robustness of the initial decision is crucial. They consider the work of a Bavarian silviculturalist, Karl Gayer, who claimed, in the 1886, that the forest condition must be able to deal with the uncertainty of future development and recommended the use of «mixed forest». Starting from this theory, they use a portfolio analysis to compare the performances of a mixed forest management with single species forest management. They demonstrate that mixed forests decrease the risk, even if also the profitability of the forests fall. Risk adverse decision-maker can choose this kind of forest management strategy, due to a significant risk attenuation. They find that the mix between the spruce and beech investments can lead to a less risky strategy (the lowest variability is with 20% spruce and 80% beech). Knoke (2008) come back on this issue in another article with the aim to present different possible decision criteria for the assessment of the portfolios. He discusses three possible decision rules: i) the mean/variance; ii) the stochastic dominance criterion; iii) the information gap approach. He finds that these different decision rules have different data requirements and therefore they can be used accordingly to the information available. These topics have been discussed also by other contributions: Knoke *et al.* (2015) and Hildebrandt and Knoke (2009; 2011).

Another interesting perspective comes from Castro *et al.* (2015), who use portfolio analysis in the *agricultural sector* in an attempt to find the right balance between organic and conventional banana in Ecuador, using the organic one in reducing the volatility of the investments made. The organic cultivation is described as more costly due to more labour contained in the process, but it doesn't necessitate fertilizers and pesticides, thus, finally, the overall cost results similar. The conventional production is more productive but it is also more volatile, due to the general impoverishment of the soil, the losses of biodiversity and the contamination of the water resources. Moreover, consumers are willing to pay more for the organic products and the prices for these goods are usually more stable, as emerges from an analysis of historic data. Therefore, there is an interesting relationship among the two different production alternatives, suggesting the possibilities to explore the portfolio analysis methodology in the attempt to identify the opportunities made by mixing the organic and traditional production. In summary, although organic banana appears less attractive as a single option, this option, when embedded in a land-use portfolio together with other crops, may improve the economic return of the Ecuadorian banana farms (Castro *et al.*, 2015). Conclusively, they suggest the general importance of diversification in the management of a farm, even if with wealthier farmers, the attitude toward risk increases. «More intensive diversification is probably more important for poorer farmers, who are both more exposed to and more adverse to risk, and they usually lack strategies to hedge against risks. Ultimately, wealthier farmers can afford better technologies and have better access to information» (Castro *et al.*, 2015).

More specific experience in the *climate change* field is limited to few examples, focused on the biodiversity management and land-use allocation contexts. Ando and Mallory (2012) apply the MPT to optimal spatial targeting of conservation activity, using wetland habitat conservation in the Prairie Pothole Region (PPR). The entity responsible for the management of the protected area is the Fish and Wildlife Service and it seeks to quadruple the amount of habitat protected in the PPR. Lands have a different performance in the Cover-Cycle Index (CCI), a measure of wetland habitat quality which creates an order of land with different conservation priorities. The authors identify three different sub-regions of this reserved area in the North of the United States: Western, Central and Eastern. Under historic conditions, modellers find that the best wetland habitat is in the Central subregion and therefore the conservation efforts should be concentrated mainly on this site. However, the quality of the natural environment in that lands is highly influenced by the mean temperature and the distribution of the precipitations. Thus, climate change considerably changes the quality of these areas, eventually compromising the initial investment choices made. In the attempt to find a more robust investment solution to the different possible futures, they structure a portfolio analysis considering the design of different portfolios with different shares of the amount of land in each of the three parts available. The climate change scenarios considered are four (no climate change, +2°, +4° and + 4° C with precipitation increased by +10%) and they test two different distribution of

probabilities for these futures. Due to the high uncertainty connected to climate change, they consider two sample probabilities distributions to demonstrate the sensitivity of optimal portfolio analysis to assumptions about outcome probabilities: the first distribution is called «no change likely» and is weighted heavily toward historic conditions, whereas the other is called «uniform» and assumes that each climate scenario is equally likely to occur. They consider as costs the value of the lands that must be purchased and as benefits the suitability of the land due to the Cover-Cycle Index. They structure two different analysis one just focused on the benefits and another one considering a ratio between habitat quality and land cost.

Four main conditions are identified for an effective use of the MPT: i) climate change raises a considerable uncertainty in the benefits and costs of a resource management policies; ii) adaptation decisions have to be made much time before this uncertainty might be resolved; iii) the policy is focused on a spatial region over which the outcome of interest is somewhat fungible; iv) although the MPT can be used in vary circumstances, the best results of the diversification exercise emerge when the performances of the different assets are negatively correlated.

Mallory and Ando (2014) presented another work on this case study, developing some key dimensions connected to the counting of the economic benefits of the preserved lands. They suggest using the economic value of the land in the case that economic value is not perfectly correlated with the parameter which measure the quality of the land. To generate plausible monetary values for the benefits associated with conservation of habitat which varies in quality, they use estimates of willingness to pay for wetland retention and restoration from a study in a Canadian portion of the PPR that borders the US. The analysis also makes assumptions about the possible evolution of the benefits according to the impacts of climate change. However, both the cost of the land and the willingness to pay could vary according to climate change and the scarcity of the land in the future and these values are essential in finding the correct shape of the efficient frontier. Therefore, an accurate analysis of these parameters is highly recommended.

Ando *et al.* (2018) work again on the MPT in the natural conservancy context and they make a comparison between three portfolio analysis case studies in the United States, with the aim to find key characteristics which are good indicators of the suitability of the portfolio analysis: many negative correlations among the ecological returns in different assets; a second-best asset that has expected ecological returns almost as good as the returns in the best asset; and many assets that have little uncertainty in their ecological outcomes across climate scenarios. Those three characteristics are intuitive, so resource-investment planners can anticipate whether a case is likely to have any of those features and thus whether MPT is likely to have any of those features and thus whether MPT is likely to provide low-cost environmental risk reduction.

Another climate change case study is proposed by Crowe and Parker (2008), who show how MPT can use the results of a climate change impact model to select

an optimal set of seed sources to be used in regenerating forests of white spruce in an environment of multiple, equally plausible future climates. This study shows that components of solutions are not selected to perform equally well across all plausible futures; but rather, that components are selected to specialise in particular climate scenarios. The negative correlation between the performances of the assets in the portfolios makes the investment more stable. Here, MPT is again recognized as a powerful instrument in dealing with uncertainty, helpful in taking robust decisions.

Dittrich *et al.* (2016) present instead an analysis of the adaptation strategies suggested for the livestock sector, and they recommend the portfolio analysis for the economic appraisal of long-lifetime measures in the attempt to combat heat stress in livestock. Their approach to address heat stress in livestock is to diversify the breeds in a particular herd to reduce the risk of heat stress while trading off some productivity. Having a number of high-productivity animals in the herd with low heat tolerance levels and a number of lower-productivity animals with high heat tolerance will achieve this objective. It should be noted that this is not an adaptation to long-term temperature changes (as the productive lifetime of a dairy cow usually does not exceed 5 years); rather, it is an adaptation to increased variability in climate due to climate change.

Another interesting analysis comes from the paper written by Niggol Seo (2010), which tries to evaluate the resilience to climate change of an integrated farm (crops and livestock) and a specialised farm on crop production. He believes that Africa farmers will adapt to climate change by moving away from a specialised portfolio in crops to a mixed portfolio and that the integrated farm will perform better in a hotter world. He considers the expected effects of an increase of the temperature and of the rainfalls due to climate change scenarios. He finds that climate change will have a negative impact on the agricultural sector in developing countries, affecting the revenues of both crops and livestock. Furthermore, He finds that specialised crop farms are more vulnerable to the climate change effects than the integrated ones due to portfolio diversification. In a similar work, Niggol Seo (2010) replicates the methodology used in the previous work, this time focusing on the South American countries, reaching similar results.

5. CONCLUSIONS

The Modern Portfolio Theory is fundamentally based on the seminal work of Markowitz (1952), which started systematising key concepts of the analytical approach, applying this methodology in the finance sector. MPT has the capacity to help decision-makers, both private and public, in planning investment in an uncertain framework, giving them the opportunity to find ways to reduce the variability of the expected outcomes, without compromising economic returns. As a consequence, MPT overcame the boundaries of the finance sector and it has been widely used in other fields, including energy sector, fishes harvesting decisions, biodiversity conservation, forest management, agriculture, water resource management, invasive pest and disease surveillance, spatial planning and conservation under climate uncertainty.

On the basis of our literature review, we identify that the MPT has various important strengths:

- i) It is a strong analytical tool for the inclusion of the uncertainty and of a plurality of possible scenarios in the economic analysis; therefore, even though the climate change uncertainty is deep and it can significantly hamper the decision-making processes, there are strategies to take informed adaptation policies, robust to a high variety of possible climatic futures
- ii) It demonstrates the power of diversification for the reduction of risk and for the increasing of the performances of a natural site or a natural resource
- iii) It can be used in different contexts, due to its versatility and its capacity to deal with different kinds of data and measurements;
- iv) The results are presented on the efficient frontier, an effective instrument for the communication of the performances of the different investments, collected in the various portfolios. The efficient frontier could be useful in various contexts in the attempt to show the available options and the risk connected to these solutions. Both technical and non-technical actors could be informed through this representation of the economic results of the analysis, effectively communicating the climate change effects on the policy outcomes.
- v) It introduces new decision criteria besides the traditional economic return proposed by the cost-benefit analysis.

However, some limits also emerged:

- i) In some cases, portfolio analysis requires a significant amount of data and information;
- ii) Natural performances and service provided could be used instead of economic values in the attempt to extend the number of interventions that this tool can evaluate. However, in some cases the use of economic data leads to different results. Therefore, portfolio analysis seems to remain in the boundaries of an economic analysis, with the strengths and weaknesses of this field. It should be integrated with other inquiries: e.g. an analysis of the preferences of the local stakeholders, an extended analysis of the environmental or social effects of the project;
- iii) Portfolio analysis still relies on probabilities for the evaluation of the ENPV;
- iv) It requires good computational skills, a plurality of competencies and it is highly time consuming;
- v) This instrument is not sufficient for the identification of the recommended measures for a specific community. Good policy processes should be designed, in the attempt to iteratively monitor and evaluate the performances of the measure, progressively updating the climate change scientific knowledge. Furthermore, a stakeholder engagement is essential, with the aim of designing more

comprehensive adaptation strategies, recognizing the values and the priorities of the local communities. Portfolio analysis is just a part of this wider process.

Thus, whilst the principles of MPT and its applications outside of the financial sector demonstrate its potential as an analytical tool with which to effectively handle uncertainties relating to climate change adaptation, the identified limitations need to be addressed to encourage its wider take-up. One promising direction, identified by Watkiss *et al.* (2015), is to investigate the potential for the method's specification to be simplified without sacrificing its' analytical qualities. This 'light touch' approach might involve a broader brush approach to data collection related to the costs and benefits, perhaps using more aggregated measures of the various components that comprise the costs and benefits of adaptation investments. This might become feasible, for example, as the market for climate services, including climate scenarios, develops further and climate data providers become better able to tailor data provision to the user communities. More fundamentally, there is a need for those with experience in MPT application to better share the lessons that they have learnt and demonstrate the central principles involved in its' use.

REFERENCES

- ADGER, N.W.; BARNETT, J.; BROWN, K.; MARSHALL, N.; O'BRIEN, K. (2013): «Cultural dimensions of climate change impacts and adaptation», *Nature Climate Change*, 3(2): 112.
- AERTS, J.C.J.; BOTZEN, W.; VEEN, A.V.D.; KRYWKOW, J.; WERNERS, S. (2008): «Dealing with uncertainty in flood management through diversification», *Ecology and Society*, 13(1).
- ALVAREZ, S.; LARKIN, S.L.; ROPICKI, A. (2017): «Optimizing provision of ecosystem services using modern portfolio theory», *Ecosystem Services*, 27: 25-37.
- ANDO, A.W.; MALLORY, M.L. (2012): «Optimal portfolio design to reduce climate-related conservation uncertainty in the Prairie Pothole Region», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(17): 6484-6489.
- ANDO, A.W.; FRATERRIGO, J.; GUNTENSPERGEN, G.; HOWLADER, A.; MALLORY, M.; OLKER, J.H.; STICKLEY, S. (2018): «When portfolio theory can help environmental investment planning to reduce climate risk to future environmental outcomes, and when it cannot», *Conservation Letters*, 11(6): 1259.
- BOARDMAN, A.; GREENBERG, D. H.; VINING, A.R.; WEIMER, D.L. (2018): *Cost-benefit analysis: concepts and practice*, Cambridge University Press, Cambridge UK.
- CASTRO, L.M.; CALVAS, B.; KNOKE, T. (2015): «Ecuadorian Banana Farms Should Consider Organic Banana with Low Price Risks in Their Land-Use Portfolios», *PloS one*, 10(3).
- CROWE, K.; PARKER, W. (2008): «Using portfolio theory to guide reforestation and restoration under climate change scenarios», *Climatic Change*, 89(3): 355-370.
- DITTRICH, R.; WREFORD, A.; MORAN, D. (2016): «A survey of decision-making approaches for climate change adaptation: Are robust methods the way forward?», *Ecological Economics*, 122: 79-89.
- EDWARDS, S.F.; LINK, J.S.; ROUNTREE, B.P. (2004): «Portfolio management of wild fish stocks», *Ecological Economics*, 49(3): 317-329.
- EUROPEAN UNION (2017): *Report from the commission to the European parliament and the council on the implementation of the EU Strategy on adaptation to climate change*. COM/2018/738 final.

- FABOZZI F.J.; GUPTA, F.; MARKOWITZ, H.M. (2002): «The legacy of the Modern Portfolio Theory», *The Journal of Investing*, 11(3): 7-22.
- FABOZZI, F.J. (2008): *Handbook of Finance, Financial Markets and Instruments*, 1, John Wiley & Sons.
- FANKHAUSER, S. (2017): «Adaptation to climate change», *Annual Review of Resource Economics*, 9: 209-230.
- FIELD, C.B.; BARROS, V.R.; MACH, K.J.; MASTRANDREA, M.D.; VAN AALST, M.; ADGER, W.N.; ARENT, D.J.; BARNETT, J.; BETTS, R.; BILIR, T.E.; BIRKMANN, J.; CARMIN, J.; CHADEE, D.D.; CHALLINOR, A.J.; CHATTERJEE, M.; CRAMER, W.; DAVIDSON, D.J.; ESTRADA, Y.O.; GATTUSO, J.-P.; HIJIOKA, Y.; HOEGH-GULDBERG, O.; HUANG, H.Q.; INSAROV, G.E.; JONES, R.N.; KOVATS, R.S.; ROMERO-LANKAO, P.; LARSEN, J.N.; LOSADA, I.J.; MARENGO, J.A.; MCLEAN, R.F.; MEARNES, L.O.; MECHLER, R.; MORTON, J.F.; NIANG, I.; OKI, T.; OLWOCH, J.M.; OPONDO, M.; POLOCZANSKA, E.S.; PÖRTNER, H.-O.; REDSTEER, M.H.; REISINGER, A.; REVI, A.; SCHMIDT, D.N.; SHAW, M.R.; SOLECKI, W.; STONE, D.A.; STONE, J.M.R.; STRZEPEK, K.M.; SUAREZ, A.G.; TSCHAKERT, P.; VALENTINI, R.; VICUÑA, S.; VILLAMIZAR, A.; VINCENT, K.E.; WARREN, R.; WHITE, L.L.; WILBANKS, T.J.; WONG, P.P.; YOHE, G.W. (2014): *Technical summary. 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, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 35-94.
- FIGGE, F. (2004): «Bio-folio: applying portfolio theory to biodiversity», *Biodiversity and Conservation*, 13(4): 827-849.
- FORD, J.D.; BERRANG-FORD, L.; PATERSON J. (2011): «A systematic review of observed climate change adaptation in developed nations: a letter», *Climatic Change*, 106(2): 327-336.
- FORD, J.D.; BERRANG-FORD, L.; BUNCE, A.; MCKAY, C.; IRWIN, M.; PEARCE, T. (2015): «The status of climate change adaptation in Africa and Asia», *Regional Environmental Change*, 15(5): 801-814.
- FRANCIS, J.C.; KIM, D. (2013): *Modern portfolio theory: Foundations, analysis, and new developments*, 795, John Wiley & Sons.
- HALL, N. (2017): «What is adaptation to climate change? Epistemic ambiguity in the climate finance system», *International Environmental Agreements*, 17(1): 37-53.
- HALLEGATTE, S.; SHAH, A.; LEMPET, R.; BROWN, C.; GILL, S. (2012): *Investment Decision Making Under Deep Uncertainty*, World Bank.
- HALPERN, B.S.; WHITE, C.; LESTER, S.E.; COSTELLO, C.; GAINES, S.D. (2011): «Using portfolio theory to assess trade-offs between return from natural capital and social equity across space», *Biological Conservation*, 144(5): 1499-1507.
- HEAL, G.; MILLNER, A. (2014): «Reflections: uncertainty and decision making in climate change economics», *Review of Environmental Economics and Policy*, 8(1): 120-37.
- HILDEBRANDT, P.; KNOKE, T. (2009): «Optimizing the shares of native tree species in forest plantations with biased financial parameters. Ecological Economics», 68(11), pp. 2825-2833.
- HILDEBRANDT, P.; KNOKE, T. (2011): «Investment decisions under uncertainty: A methodological review on forest science studies», *Forest Policy and Economics*, 13(1): 1-15.
- HILLS, J.; CARLISLE, M.; LE TISSIER, M.; MUIR, D.; ROBINSON, C. (2009): «Landscape-scale analysis of ecosystem risk and returns: A new tool for ICZM», *Marine Policy*, 33(6): 887-900.
- HOEKSTRA, J. (2012): «Improving biodiversity conservation through modern portfolio theory», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(17): 6360-6361.
- KNIGHT, F.H. (1933): *Risk, uncertainty and profit*, London School of Economics and Political Science.
- KNOKE, T. (2008): «Mixed forests and finance – Methodological approaches», *Ecological Economics*, 65(3): 590-601.
- KNOKE, T.; PAUL, C.; HÄRTL, F.; CASTRO, L.M.; CALVAS, B.; HILDEBRANDT, P. (2015): «Optimizing agricultural land-use portfolios with scarce data – A non-stochastic model», *Ecological Economics*, 120: 250-259.
- KNOKE, T.; STIMM, B.; AMMER, C.; MOOG, M. (2005): «Mixed forests reconsidered: A forest economics contribution on an ecological concept». *Forest Ecology and Management*, 213(1): 102-116.
- KOELLNER, T.; SCHMITZ, O.J. (2006): «Biodiversity, ecosystem function, and investment risk», *BioScience*, 56(12): 977-985.
- LESNIKOWSKI, A.C.; FORD, J.D.; BERRANG-FORD, L.; BARRERA, M.; HEYMANN, J. (2015): «How

- are we adapting to climate change? A global assessment», *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 20(2): 277-293.
- MALLORY, M.L.; ANDO, A.W. (2014): «Implementing efficient conservation portfolio design», *Resource and Energy Economics*, 38: 1-18.
- MARINONI, O.; ADKINS, P.; HAJKOWICZ, S. (2011): «Water planning in a changing climate: Joint application of cost utility analysis and modern portfolio theory», *Environmental Modelling and Software*, 26(1): 18-29.
- MARKOWITZ, H.M. (1952): «Portfolio selection», *The Journal of finance*, 7(1): 77-91.
- (1956): «The optimization of a quadratic function subject to linear constraints», *Naval research logistics quarterly*, 3(1-2): 111-133.
- (1991): «Foundations of portfolio theory», *The Journal of finance*, 46(2): 469-477.
- MATTHIES, B.D.; JACOBSEN, J.B.; KNOKE, T.; PAUL, C.; VALSTA, L. (2019): «Utilising portfolio theory in environmental research – New perspectives and considerations», *Journal of Environmental Management*, 231: 926-939.
- MATTHIES, B.D.; KALLIOKOSKI, T.; EKHOLM, T.; HOEN, H.F.; VALSTA, L.T. (2015): «Risk, reward, and payments for ecosystem services: A portfolio approach to ecosystem services and forestland investment», *Ecosystem Services*, 16: 1-12.
- MOSER, S.C.; EKSTROM, J.A.; KASPERSON R.E. (2010): «A framework to diagnose barriers to climate change adaptation», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(51): 22026-22031.
- PINDYCK, R.S. (2007): «Uncertainty in environmental economics», *Review of Environmental Economics and Policy*, 1(1): 45-65.
- PUNT, A.E.; SMITH, A.D.M. (2001): The gospel of maximum sustainable yield in fisheries management: birth, crucifixion and reincarnation. In: J.D. Reynolds, G.M. Mace, K.H. Redford, J.G. Robinson (Eds.), *Conservation of exploited species*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 41-66
- RINGER, M.; VIDAVER, D.; OSTROVER, S.; BAHCECI, S. (2007): *Portfolio Analysis and its potential application to utility long-term planning*, California Energy Commission.
- SANCHIRICO, J.N.; SMITH, M.D.; LIPTON, D.W. (2008): «An empirical approach to ecosystem-based fishery management», *Ecological Economics*, 64(3): 586-596.
- SCHIPPER, E.L.F. (2007): «Climate change adaptation and development: Exploring the linkages», *Tyndall Centre for Climate Change Research Working Paper*, 107: 13.
- SEO, S.N. (2010): «A micro econometric analysis of adapting portfolios to climate change: adoption of agricultural systems in Latin America», *Applied Economic Perspectives and Policy*, 32(3): 489-514.
- (2010): «Is an integrated farm more resilient against climate change? A micro-econometric analysis of portfolio diversification in African agriculture», *Food Policy*, 35(1): 32-40.
- SYLVIA, G.; TUININGA, C.; LARKIN, S.L. (2003): «Portfolio analysis for optimal seafood product diversification and resource management», *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 28: 252-271.
- UNFCCC (2010): *Report of the Conference of the Parties on its sixteenth session*, Cancun.
- UNITED NATIONS (2015): *Paris Agreement*.
- (2015): *Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development*. A/RES/70/1.
- UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION (2015): *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction, 2015 – 2030*.
- WATKISS, P.; HUNT, A.; BLYTH, W.; DYSZYNSKI, J. (2015): «The use of new economic decision support tools for adaptation assessment: a review of methods and applications, towards guidance on applicability», *Climatic Change*, 132(3): 401-416.
- WILBY, R.L.; DESSAI, S. (2010): «Robust adaptation to climate change», *Weather*, 65(7): 180-185.
- YEMSHANOV, D.; KOCH, F.H.; LU, B.; LYONS, D.B.; PRESTEMON, J.P.; SCARR, T.; KOEHLER, K. (2014): «There is no silver bullet: The value of diversification in planning invasive species surveillance», *Ecological Economics*, 104: 61-72.

Financiando las políticas climáticas y de sostenibilidad: el impacto de los bonos sostenibles en el País Vasco

Financing climate and sustainability policies: the impact of sustainability bonds on the Basque Country

Las finanzas del clima se refieren al flujo de recursos financieros para luchar contra el cambio climático y contribuir al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). El mercado de deuda puede jugar un papel esencial mediante los bonos sostenibles. Para financiar proyectos alineados con los ODS y la Agenda Basque Country 2030, el Gobierno Vasco-Eusko Jaurlaritzak emitió en 2018 bonos sostenibles por 500 millones de euros. Los objetivos de este artículo son evaluar el impacto individual de cada proyecto utilizando indicadores de impacto económico, social y ambiental; y estimar el impacto total del bono en la producción, la renta y el empleo del País Vasco utilizando tablas *input-output*. Los resultados muestran que por cada euro invertido aumenta la producción en 1,69 € y la renta en 0,398€. Asimismo, por cada millón de euros invertidos se generan 16,79 empleos.

Klimaren finantzek finantza-baliabideen fluxuak aipatzen dituzte klima aldatetaren aurka borrokatzeko eta Garapen Jasangarriaren Helburuak lortzen laguntzeko (GJH). Zor-merkatuak funtsezko papera joka dezake Bonu Jasangarrien bidez. GJH eta Agenda Basque Country 2030-rekin lerrokatutako proiektuak finantzatzeko, Eusko Jaurlaritzak bonu jasangarriak atera zituen 2018an, 500 miloi euro guztira. Batetik, proiektu bakoitzaren inpaktu indibiduala ebaluatzea da artikulu honen helburua, inpaktu ekonomiko, sozial eta ingurumen-inpaktuaren adierazleak erabiliz; eta, bestetik, aintzat hartzea bonuaren inpaktu osoa Euskal Autonomia Erkidegoko produkzioan, errentan eta enpleguan, input-output taulak erabiliz. Emaitzek erakusten dute inbertitutako euro bakoitzeko produkzioa 1,69 € handitzen dela eta errenta 0,398€. Hala-ber, inbertitutako miloi euro bakoitzeko 16,79 enplegu sortzen dira.

Climate finance refers to the flow of financial resources for the fight against climate change and contribute to the achievement of the Sustainable Development Goals (SDG). The debt market can play an essential role through Sustainability Bonds. To finance projects aligned with the SDGs and the Agenda Basque Country 2030, in 2018, the Basque Government issued sustainability bonds for a total value of 500 million Euros. The aims of this paper are to assess the individual impact of each project using economic, social and environmental impact indicators; and to estimate the total impact of the bond on production, income and employment in the Basque Country using input-output tables. Results show that, for every euro invested, an increase in production of €1.69 and in income of €0.398 is generated. Likewise, for every million Euros invested, 16.79 jobs are created.

Itziar Ruiz-Gauna

Metroeconomica, S.L.

Ibon Galarraga

Metroeconomica, S.L. y Basque Centre for Climate Change (BC3)

Patxi Greño

Metroeconomica, S.L.

83

Índice

1. Introducción
2. Bonos sostenibles en Euskadi
3. Metodología
4. Resultados
5. Conclusiones

Referencias bibliográficas

Anexos

Palabras clave: tablas *input-output*, Gobierno Vasco-Eusko Jaurlaritza, mercado de deuda, objetivos de desarrollo sostenible.

Keywords: input-output tables, Basque Government, debt market, sustainable development goals.

Nº de código JEL: C67, G18, H63

Fecha de entrada: 20/04/2020

Fecha de aceptación: 25/05/2020

Agradecimientos: Este artículo está basado en los trabajos realizados por Metroeconomica, S.L. para el Gobierno Vasco-Eusko Jaurlaritza en el informe «Impacto Económico, Ambiental y Social del Bono Sostenible de Euskadi 2018», accesible en <http://www.euskadi.eus/deuda-publica/web01-a2finan/es/>

Los autores desean agradecer las labores de dirección técnica realizadas por parte del Departamento de Hacienda y Economía del Gobierno Vasco-Eusko Jaurlaritza.

1. INTRODUCCIÓN

Las finanzas del clima es un término que hace referencia al flujo de recursos financieros asignados a la lucha contra el cambio climático, tanto en su vertiente de mitigación como de adaptación. Más concretamente, según el Comité Permanente de Financiación de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés), «las Finanzas del Clima tienen como objetivo reducir las emisiones e incrementar los sumideros de gases de efecto invernadero, así como reducir la vulnerabilidad, mantener y aumentar la resiliencia de los sistemas humanos y ecológicos ante los efectos adversos del cambio climático»

(UNFCCC, 2014). Sin embargo, bajo este paraguas, caben dos posibilidades para el uso de los fondos: por un lado, proyectos de mitigación y adaptación en países en vías de desarrollo (Pittel & Rübbelke, 2013; Trabacchi & Buchner, 2017) y, por otro lado, la descarbonización de las economías desarrolladas (véase Larrea *et al.* (2018) para un análisis más detallado).

En la decimoquinta Conferencia de las Partes (COP) de la UNFCCC celebrada en Copenhague en 2009, se creó el llamado Fondo Verde del Clima para que los países desarrollados apoyasen financieramente a los países en vías de desarrollo de forma que estos últimos pudiesen reducir sus emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y adaptarse a los impactos del cambio climático (Copenhague Agreement, 2009). En este sentido, el Acuerdo de Copenhague estableció que los países desarrollados se comprometerían a proporcionar conjuntamente recursos por un valor de 30 mil millones de dólares para la creación de un fondo de acceso rápido, dando prioridad a proyectos de adaptación en aquellos países más vulnerables. En cuanto a mitigación y transparencia en la implementación, esta cifra aumentaría hasta los 100 mil millones de dólares anuales para el año 2020 (Galarraga *et al.*, 2009). La financiación provendría de fuentes públicas, privadas, bilaterales y multilaterales.

Desde ese momento, las finanzas del clima han constituido un tema central en las sucesivas cumbres del clima, incluyendo la COP 21 en la que se acordó el Acuerdo de París (Galarraga *et al.*, 2017). De hecho, fue en esta cumbre donde se fijó que el objetivo de 100 mil millones se prorrogase hasta 2025, momento en el que se determinaría un nuevo objetivo¹. Por lo tanto, las finanzas del clima continúan ocupando un espacio de gran relevancia, especialmente en lo relativo a cómo la comunidad internacional plantea seguir adelante con la implementación del Acuerdo de París. El mundo académico también ha venido haciendo importantes avances en torno a la gobernanza, la organización y el desembolso de la financiación a nivel internacional (Persson *et al.*, 2009; Butzengeiger-Geyer *et al.*, 2011; Bird *et al.*, 2011; Carraro & Massetti, 2012). No obstante, sigue existiendo un debate sobre la distribución de los fondos por tipos de proyectos, la cantidad a destinar a cada proyecto y los plazos (Román & Galarraga, 2016; Román *et al.*, 2017a; 2017b). A pesar de que los proyectos de adaptación deberían tener misma prioridad que las actividades de mitigación, existe un fuerte sesgo hacia financiar acciones de mitigación – *mitigation bias* – (Abadie *et al.*, 2013), de forma que los fondos destinados para medidas de adaptación continúan siendo mucho menores, especialmente por parte del sector privado. Una de las principales razones radica en la idea de que, apostando por acciones de mitigación, se reducirán, a largo plazo, los costes de adaptación (Buchner *et al.*, 2011). Ante este hecho, las instituciones se han limitado a proporcionar asis-

¹ La Unión Europea presentó, asimismo, una hoja de ruta hacia los 100 mil millones de dólares para movilizar esta cantidad de recursos en 2020 y el Gobierno español anunció recientemente la aportación de 150 millones de euros al Fondo Verde del Clima.

tencia técnica y a centrarse en proyectos específicos de adaptación que estén justificados bajo mandatos concretos (Fankhauser & Burton, 2011).

En este contexto, el mercado de deuda puede jugar un papel fundamental en la financiación de proyectos que contribuyan a la sostenibilidad ambiental y social. El desarrollo del mercado de bonos verdes, sociales y sostenibles es clave para ello.

El primer bono verde surgió en el año 2008 como resultado de una iniciativa conjunta del Banco Mundial y el grupo financiero sueco Skandinaviska Enskilda Banken. Desde entonces, son cada vez más los inversores que destinan parte de sus carteras a apoyar proyectos ambientales, sociales y de buen gobierno. Los bonos verdes garantizan que el dinero asociado a su compra se destinará a financiar proyectos con un impacto ambiental positivo. En sus once años de historia, el mercado de ese tipo de bonos ha pasado de estar dominado por organismos multilaterales como el Banco Mundial a convertirse en un mercado en el que participan tanto gobiernos como empresas públicas y organizaciones privadas.

Con el paso de los años el concepto de bono verde se ha ampliado a otros bonos temáticos como los bonos sociales (para apoyar causas sociales), los bonos azules (para apoyar proyectos pesqueros y marinos sostenibles) o los bonos sostenibles (para apoyar tanto proyectos sociales como ambientales). Los bonos sostenibles son cualquier tipo de deuda emitida por instituciones públicas y privadas cuyos ingresos se destinarán exclusivamente a financiar o refinanciar, parcial o totalmente, nuevos y/o existentes, proyectos verdes y sostenibles que contribuyan a la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

En 2018, el Gobierno Vasco-Eusko Jaurlaritza (GV-EJ) emitió bonos sostenibles por 500 millones de euros, cuyos fondos serán empleados para financiar proyectos alineados con los ODS y la Agenda Euskadi Basque Country 2030. El objetivo de este artículo es analizar el impacto de esta emisión desde una doble vertiente. En primer lugar, se evalúa el impacto individual de cada proyecto financiado utilizando indicadores de impacto económico, social y ambiental (práctica habitual en el contexto de la evaluación de este tipo de bonos). En segundo lugar, se estima el impacto total del bono en la producción, la renta y el empleo del País Vasco utilizando las tablas *input-output* (en adelante, TIO).

El artículo se organiza de la siguiente manera: el segundo apartado ofrece una visión de los bonos sostenibles en Euskadi, seguido de un tercero en el que se expone la metodología empleada. En el cuarto apartado se presentan los principales resultados obtenidos y el último recoge las conclusiones.

2. BONOS SOSTENIBLES EN EUSKADI

En 2015, la Asamblea General de Naciones Unidas aprobó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible que retoma los ODS para 2000-2015. Estos principios no di-

cen lo que tenemos que hacer, sino que definen el contexto para mejorar las políticas públicas y fijar las prioridades adaptadas a cada realidad territorial.

Comprometido con la adaptación de esta Agenda a escala local, el GV-EJ presentó en 2018 la Agenda Euskadi Basque Country 2030, cuyo ámbito temporal abarca el periodo 2016-2020. Esta estrategia refleja el grado de contribución del Programa de Gobierno de la XI Legislatura (2016-2020) con los ODS (véase Gobierno Vasco (2018)).

En este contexto, el GV-EJ ha desarrollado un Marco de Bonos Sostenibles destinado a proyectos tanto verdes como sociales. Este marco está alineado con los cuatro Principios de los Bonos Verdes (GBP, por sus siglas en inglés) y los Principios de los Bonos Sociales (SBP, por sus siglas en inglés) establecidos por la Asociación Internacional de Mercados de Capitales (AIMC, 2017, 2018). Los cuatro principios, que son los mismos para ambos tipos de bonos con la salvedad de la tipología de proyectos a los que podrán ir destinados los fondos (principio 1), se describen a continuación.

- Principio 1: Uso de los fondos. Los fondos deben ser destinados a proyectos con claros beneficios de sostenibilidad. Dichos proyectos deben ser evaluados y, cuando sea factible, cuantificados por el emisor. En el caso de que la totalidad o una proporción de los fondos sea utilizada para refinanciar, se recomienda que los emisores proporcionen una estimación del porcentaje de financiación frente a la refinanciación. Los tipos de proyectos más comúnmente financiados por los bonos sociales son: vivienda asequible; fortalecimiento y avance socioeconómico; seguridad alimenticia, infraestructura básica asequible y acceso a servicios esenciales; y generación de empleo. En lo que respecta a los bonos verdes, las tipologías de proyectos más comúnmente financiados son: energía renovable; eficiencia energética; prevención de la contaminación; gestión sostenible de recursos naturales, uso del suelo y agua e insumos agrícolas inteligentes; conservación de la biodiversidad terrestre y marina; transporte limpio; adaptación al cambio climático; productos ecoeficientes y adaptados a la economía circular; edificios ecológicos.
- Principio 2: Proceso de evaluación y selección de proyectos. El emisor de los bonos debe comunicar a los inversores los objetivos de sostenibilidad, el proceso a través del cual determina la forma en que los proyectos encajan dentro de las categorías anteriores y los criterios de elegibilidad incluyendo, si cabe, los criterios de exclusión y cualquier otro proceso que sirva para gestionar riesgos y costes asociados a los proyectos. Para ello, deben ser transparentes y permitir la evaluación externa.
- Principio 3: Gestión de los fondos. Los fondos deben estar controlados por el emisor de manera apropiada y transparente y atestiguados por el emisor de

manera formal. Asimismo, el emisor permitirá la revisión complementaria por parte de un auditor o un tercero para verificar el método de seguimiento.

- Principio 4: Elaboración de informes. El emisor deberá hacer y mantener información actualizada anualmente sobre el uso de los fondos y los beneficios de sostenibilidad obtenidos. Debe incluir una lista de proyectos a los que se han asignado los fondos, así como una breve descripción de los proyectos y la cantidad asignada. Se recomienda utilizar indicadores cualitativos (y cuantitativos cuando sea posible) del rendimiento de los bonos.

A través de la Bolsa de Bilbao, el GV-EJ emitió en junio de 2018 por primera vez bonos sostenibles por importe total de 500 millones de euros². Dichos bonos tienen un plazo de 10 años y devengarán un cupón anual del 1,45%. Los fondos serán empleados para financiar proyectos alineados con la Agenda Euskadi Basque Country 2030.

El objetivo último es que Euskadi avance hacia el cumplimiento de los ODS, un tema en el que nuestra comunidad prospera a buen ritmo si se compara con otras comunidades autónomas. En 2017, Euskadi se encontraba entre las dos comunidades autónomas que mejor se comportaban en relación con sus compromisos y avances hacia los ODS: estaba, por ejemplo, entre las cuatro con mayor igualdad (ODS 10) y mostraba también su fortaleza en temas ambientales. Por el contrario, existía un escaso desarrollo de las energías asequibles y no contaminantes (ODS 7) y un mal comportamiento en la vertiente mitigación del cambio climático (ODS 13) (Observatorio de la Sostenibilidad, AIS Group & Fundación Ciudadanía, 2019).

3. METODOLOGÍA

El impacto se ha evaluado desde una doble vertiente. En primer lugar, se ha evaluado el impacto individual de cada proyecto financiado utilizando indicadores de impacto económico, social y ambiental (práctica habitual en el contexto de la evaluación de este tipo de bonos). En segundo lugar, se ha estimado el impacto total del bono en la producción (dimensión económica), la renta y el empleo (dimensión social) del País Vasco utilizando las TIO.

3.1. Indicadores de impacto

Como se ha mencionado anteriormente, las emisiones de los bonos sostenibles siguen los Principios de los Bonos Verdes y los Principios de los Bonos Sostenibles establecidos por la Asociación Internacional de Mercados de Capitales. El Principio 4 referido a la necesidad de elaborar informes sobre el uso hecho de los fondos y los beneficios obtenidos, recomienda utilizar indicadores cualitativos y, cuando sea posible, cuantitativos, para medir el impacto individual de los proyectos financiados con el bono.

² Tras el éxito de la esta primera emisión, en abril de 2019 se realizó una segunda por importe de 600 millones de euros.

Desde la emisión de los primeros bonos hace ya más de una década, han sido muchos los gobiernos, organismos multilaterales y empresas que han elaborado informes de impacto basados en indicadores. Los indicadores empleados han sido generalmente estáticos (es decir, se refieren al año de emisión del bono que se desea evaluar y no tiene en cuenta la evolución del indicador en años anteriores), aunque cuestiones como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero ha sido en ocasiones estimada para la vida útil del proyecto financiado. El cuadro nº 1 muestra indicadores tipo empleados.

Cuadro nº 1. INDICADORES TIPO EMPLEADOS EN INFORMES DE IMPACTO

Institución/ Región	Nº de beneficiarios	Empleos generados	CO ₂ evitado	Producción de energía	Otros
Renania del Norte	(1)	(1)	(1) y (2)		
Adif			(2)		
Comunidad de Madrid	(1)				(1) y (2)
Flandes	(1) y (2)		(1) y (2)		(1) y (2)
Región Isla de Francia	(1) y (2)	(1) y (2)	(1) y (2)		
Nordea*			(2)	(2)	
Corporación Financiera Internacional			(2)	(2)	
Caja Rural de Navarra	(1) y (2)				
Banco Mundial	(2)		(2)	(2)	

Notas: (1) Bonos sociales; (2) Bonos verdes; Grupo financiero noruego.

Fuente: Wuppertal Institut (2019); ADIF (2018); Comunidad de Madrid (2017); Flanders State of the Art (2018); Región Ile-de-France (2017); Nordea (2018), International Finance Corporation (2018); Caja Rural de Navarra (2018); Banco Mundial (2019).

El indicador más utilizado en los informes de impacto de gobiernos regionales para reportar los resultados de los bonos sociales es el número de agentes beneficiados por el proyecto. Informes como los de la Comunidad de Madrid, Flandes, la Región Isla de Francia o Renania del Norte emplean indicadores como el número de familias con vivienda social o el número de estudiantes que reciben ayudas para estudios. Otros indicadores empleados son el número escuelas de educación especial o el número escuelas públicas. Los resultados de los bonos verdes se reportan utilizando indicadores como el ahorro de materiales y emisiones, el ahorro de agua o el material reciclado o el número de vehículos limpios adquiridos. El cuadro nº 2 muestra algunos indicadores utilizados por gobiernos regionales.

Cuadro nº 2. ALGUNOS INDICADORES EMPLEADOS POR GOBIERNOS

Ejemplos de indicadores	Regiones que los emplean
Bonos sociales	
Vivienda social (familias)	Comunidad de Madrid
Ayudas para familias vulnerables	Comunidad de Madrid
Número de centros de educación con ayudas	Flandes
Creación de empleos para personas desfavorecidas	Renania del Norte
Número de estudiantes con ayudas/ becas	Flandes; Renania del Norte
Número de estudiantes que acogerá la nueva escuela	Región Isla de Francia
Número de hogares a los que suministrará energía un nuevo proyecto	Región Isla de Francia
Número de escuelas de educación especial	Comunidad de Madrid
Número de escuelas públicas	Comunidad de Madrid
Bonos verdes	
Material reciclado (t)	Flandes y Comunidad de Madrid
Ahorro de materiales (t)	Renania del Norte
Ahorro de agua (m ³)	Renania del Norte
Suelos con subsidios para uso sostenible (h ^a)	Renania del Norte
Ahorro de emisiones*	Renania del Norte
Número de vehículos limpios comprados y puntos de recarga	Comunidad de Madrid

* El ahorro de emisiones se circunscribe a cuestiones muy concretas como la rehabilitación de edificios, el cambio en el uso de modos de transporte o la transición energética (eficiencia energética y energías renovables).

El informe de impacto del bono sostenible Euskadi utiliza indicadores capaces de mostrar cómo los programas financiados han contribuido a avanzar hacia los objetivos planteados. Los impactos sociales se miden generalmente en términos de número de beneficiarios (por ejemplo, estudiantes que reciben becas, personas que perciben distintas ayudas para vivienda o personas con dificultades de inclusión con empleo). Los impactos ambientales se miden, por lo general, considerando mejoras físicas (por ejemplo, ahorro energético, superficie de suelo restaurada, ahorro de materiales o reducción de emisiones de gases de efecto invernadero). El cuadro nº 3 resume los proyectos y programas financiados con cargo al fondo sostenible Euskadi, sus objetivos y los indicadores seleccionados para hacer el seguimiento de sus resultados e impactos.

Cuadro nº 3. CATEGORÍAS DE PROYECTOS, PROGRAMAS, OBJETIVOS E INDICADORES DE IMPACTO DEL FONDO SOSTENIBLE EUSKADI

Categorías de proyectos	Programas	Objetivos	Indicadores de impacto
Proyectos y programas sociales			
Vivienda asequible	Ayudas al alquiler de vivienda	Garantizar el acceso estable a una vivienda digna y adecuada	Hogares beneficiarios de prestación
	Edificación de viviendas para el alquiler	Promover las viviendas de alquiler	Familias beneficiarias de alquiler público
Educación	Becas (no universitarias y universitarias)	Posibilitar el acceso a la educación al alumnado con problemas económicos y/o con necesidades especiales	Número de empleos creados
Salud	Modernización del sistema sanitario	Modernizar el sistema sanitario	Estudiantes beneficiarios de beca
	Ayudas de emergencia social	Prevenir, evitar o paliar situaciones de emergencia social	Empleos generados
Avance socioeconómico	Prestaciones de apoyo a la familia	Conciliar la vida familiar y laboral, y afianzar la corresponsabilidad de hombres y mujeres en el ámbito familiar	Personas perceptoras de AES
	Renta de Garantía de Ingresos	Hacer frente a gastos asociados a necesidades básicas o a gastos derivados de un proceso de inclusión laboral o social	Beneficiarios de ayudas a las familias
Generación de empleo	Planes locales de empleo	Apoyar el empleo local y contratar a personas demandantes de empleo	Personas contratadas
Proyectos y programas verdes			
Transporte limpio	Suministro de nuevas unidades de tren	Sustituir trenes antiguos por otros más modernos	Número de trenes sustituidos
	Nuevas infraestructuras ferroviarias	Construir y renovar infraestructuras ferroviarias	Emisiones de CO ² evitadas (t/año)
	Financiación de operadores ferroviarios		Emisiones de CO ² evitadas (t/año)
Prevención y control de la contaminación	Calidad del aire	Mejorar y mantener la Red de Control de la Calidad del Aire para disponer de una red tecnológicamente avanzada	Campañas de medición
			Personas con información diaria
			Nuevas estaciones de medida acreditadas

.../...

...	Categorías de proyectos	Programas	Objetivos	Indicadores de impacto	
				Consultas de empresas resueltas	Valoraciones de contaminación
Prevención y control de la contaminación	Calidad del suelo	Protección del medio ambiente	Subvencionar inversiones en materia medioambiental y eco-innovadoras	Empresas receptoras de subvención	
				Empleos creados	
	Saneamiento y depuración del agua	Mantenimiento, conservación, recuperación, restauración y mejora medioambiental de cauces y márgenes de ríos y arroyos	Mejorar los sistemas de abastecimiento, saneamiento y depuración de agua	Número de empleos creados	
				Número de actuaciones	
Gestión sostenible agua y aguas residuales	Red de seguimiento del estado de las masas de agua	Gestión de la Red de Centros Ambientales	Conservar y mejorar los ríos del País Vasco	Hectáreas conservadas o restauradas	
				Número de ríos evaluados	
	Protección del capital natural	Restauración y mejora de ecosistemas	Mantener las redes de control del estado de las masas de agua del País Vasco	Número de visitantes	
				Estudios técnicos financiados	
Conservación biodiversidad terrestre y acuática	Gestión Reserva Biosfera Urdaibai	Ecodiseño y fabricación verde	Apoyar experiencias que ayudan a conocer, entender y disfrutar del entorno natural	Hectáreas con actuaciones	
				Km de itinerarios peatonales mejorados	
	Gestión de residuos	Ayudas a la eficiencia energética y a las energías renovables	Generar conocimiento sobre hábitats y biodiversidad	Hectáreas con actuaciones	
				Proyectos subvencionados	
Eficiencia energética	Ecodiseño y fabricación verde	Gestión de residuos	Preservar los fondos marismenos, mejora del anillamiento científico de aves y erradicar especies exóticas invasoras	Número de empleos creados en ecodiseño	
				Variación tasa reciclaje escombríos	
	Ayudas a la eficiencia energética y a las energías renovables	Ecodiseño y fabricación verde	Impulsar la sostenibilidad en los sectores turístico, agrícola y forestal.	Variación tasa reciclaje RCD	
				Variación tasa reciclaje municipales	
Energía renovable	Ayudas a la eficiencia energética y a las energías renovables	Ecodiseño y fabricación verde	Fomentar el ecodiseño y la fabricación verde	Emisiones de CO2 evitadas (t/año)	
				Proyectos subvencionados	

Fuente: Elaboración propia a partir de Gobierno Vasco (2019).

Los proyectos y programas cuyo impacto se debe medir, se financian con cargo al bono sostenible y otras fuentes de financiación. Por lo tanto, una vez seleccionados los indicadores a medir, ha sido necesario desagregar el impacto total entre la parte atribuible al presupuesto total ejecutado en el año 2018 y la parte atribuible al bono sostenible. Para ello, se ha trazado la relación entre el presupuesto total ejecutado en 2018 en las categorías de proyectos y programas elegibles (y, por tanto, susceptibles de ser financiadas con el bono sostenible) y la proporción de ese presupuesto que ha sido financiado con cargo al bono sostenible. De este modo, se ha podido determinar la parte del impacto de cada proyecto atribuible al bono sostenible.

3.2. **Análisis input-output**

Para estimar el impacto que la emisión de bonos sostenibles en Euskadi ha tenido sobre la producción, la renta y el empleo de la comunidad se ha utilizado un modelo *input-output* de demanda (véase Anexo nº 1), al que se le ha añadido información adicional sobre el empleo y la renta generada. Los datos relativos a las TIO y al empleo por sectores provienen de Eustat (Eustat, 2015).

Las TIO permiten desagregar el impacto total generado por una determinada política (en nuestro caso, la emisión de bonos sostenibles) entre impacto directo, indirecto e inducido.

- Los impactos directos recogen los aumentos en la producción (demanda final) como consecuencia de los fondos destinados a proyectos sostenibles. Es decir, vienen determinados por el impacto inicial (aumento de la producción) que se producirá únicamente en los sectores financiados.
- En cambio, los impactos indirectos recogen aquellos efectos que se generan como consecuencia del efecto multiplicador que sobre la economía tiene el impacto directo (Ansuategi *et al.*, 2014). El incremento de la producción por parte de los sectores directamente financiados implicará que estos aumenten, a su vez, la demanda de bienes y servicios al resto de sectores. Los impactos indirectos recogen, por lo tanto, los ajustes en el nivel de producción del resto de sectores como consecuencia del aumento de la demanda de bienes y servicios.
- No obstante, una expansión de la demanda y de la producción también vendrá acompañada de un aumento de la renta disponible para el consumo. Los impactos inducidos son, por lo tanto, aquellos generados por el efecto expansivo de la interacción renta-consumo. Es decir, determinan el efecto que supone destinar fondos para financiar proyectos sostenibles para las familias en lugar de para los sectores productivos como ocurre con los impactos directos e indirectos.

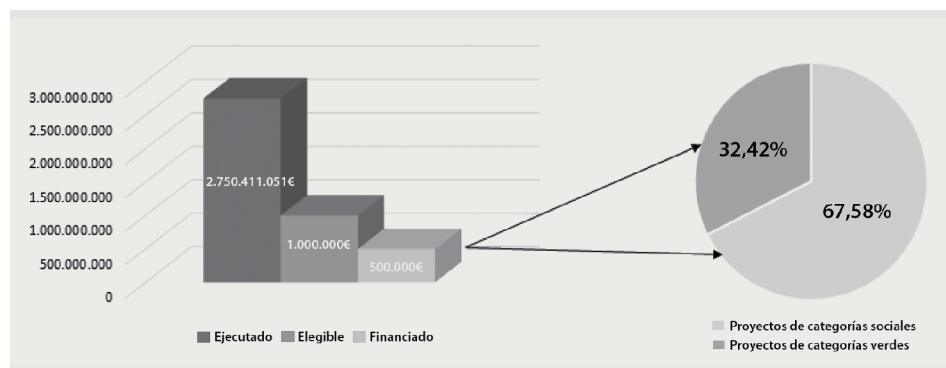
4. RESULTADOS

4.1. Impacto económico, social y ambiental de cada proyecto

El Gobierno Vasco-Eusko Jaurlaritza ejecutó en 2018 un presupuesto total superior a 2.750 millones € en proyectos que corresponden con las categorías de proyectos elegibles y susceptibles, por tanto, de ser financiadas con el bono sostenible. Algo más de 2.575 millones de € se han destinado a proyectos sociales y los restantes 175 millones de € a proyectos verdes. Del presupuesto total ejecutado, se han financiado con cargo al bono sostenible Euskadi proyectos por valor de 500 millones € que cumplen los criterios de elegibilidad. De estos, cerca de 338 millones de € (67,58%) se han destinado a proyectos sociales y los restantes 162 millones de € (32,42%) a proyectos verdes.

El gráfico nº 1 muestra el total elegible, el presupuesto ejecutado en categorías de proyectos susceptibles de ser financiadas mediante el bono sostenible y la cuantía finalmente financiada con el bono sostenible. Dentro de los proyectos financiados con el bono, se muestra la proporción de proyectos verdes y de proyectos sociales financiada.

Gráfico nº 1. **PROYECTOS ELEGIBLES, PRESUPUESTO EJECUTADO Y PRESUPUESTO (VERDE Y SOSTENIBLE) FINANCIADO CON EL BONO SOSTENIBLE EUSKADI**



Fuente: Gobierno Vasco, 2019.

Finalmente, se han trazado los proyectos y las proporciones de cada uno de ellos financiados con la parte verde y la parte social del bono. Para ello, se ha tenido en cuenta su grado de alineación con los ODS y, por tanto, con los objetivos del Programa de Gobierno de la XI Legislatura (2016-2020). El resultado es la financiación vía bono que refleja el cuadro nº 4, donde se recoge la proporción del presupuesto de cada categoría de proyecto financiada con cargo al bono sostenible.

Cuadro nº 4. PROPORCIÓN DEL PRESUPUESTO EJECUTADO FINANCIADO CON EL BONO SOSTENIBLE, POR CATEGORÍAS DE PROYECTO. LAS CIFRAS SE MUESTRAN EN MILLONES DE EUROS

Categorías de proyectos	Elegible	Ejecutado (a)	Asignación bono (b)	Ejecutado financiado con bono (b)/(a)
Vivienda asequible	110	126,1	68,4	54,24%
Educación	151	122,5	45,6	37,22%
Salud	235	1787	75	4,2%
Avance socioeconómico	210	442,5	137,1	30,98%
Generación de empleo	104	96,9	11,9	12,28%
Proyectos bono social	810	2575	338	13,13%
Transporte limpio	148	138,2	128,2	92,76%
Prevención y control de la contaminación	6,6	4,2	2,4	57,14%
Gestión sostenible agua y aguas residuales	11	17,2	16,8	97,67%
Conservación biodiversidad terrestre y acuática	6,4	3,9	3,5	89,74%
Eficiencia energética	2,3	1,5	1,5	100%
Adaptación CC	0,7	0,4	0	0%
Energía renovable	15,000	9,6	9,6	100%
Proyectos bono verde	190	175	162	92,57%
Total	1000	2750	500	18,18%

Fuente: Basado en Gobierno Vasco (2019).

En el cuadro nº 5 se muestra la alineación de cada categoría con los ODS, así como los impactos individuales que cada programa ha tenido. Como se observa, la Renta de Garantía de Ingresos es la partida que ha recibido más financiación, seguida por las inversiones en sanidad destinadas a la modernización del sistema sanitario (apertura secuencial de los servicios pendientes del Hospital Urduliz-Alfredo Espinosa), apertura de nuevos centros (Hospital de Eibar) y ampliación de algunos ya existentes (Hospital Universitario Araba), y las ayudas al alquiler de vivienda. En cuanto a las nuevas infraestructuras ferroviarias, el desarrollo de nuevas infraestructuras y la mejora de las ya existentes ha supuesto también un paso más hacia la accesibilidad universal y la movilidad sostenible (ampliación del tranvía de Vitoria-Gasteiz, obras de desdoblamiento y construcción de la nueva estación de Ermua o la modernización de movilidad urbana con el soterramiento del ferrocarril en Durango). Por su parte, la gestión de residuos, la mejora de la calidad del suelo y la restauración y mejora de los ecosistemas son las partidas con menos financiación.

Cuadro nº 5. RESULTADOS DE LOS PROYECTOS FINANCIADOS						
Categoría de proyecto	ODS	Programas	Asignación programa (millones €)	Asignación Bono (millones €)	Indicadores de impacto	
					Indicador	Unidades
PROYECTOS Y PROGRAMAS SOCIALES						
Vivienda asequible	ODS 1; ODS 11	Ayudas al alquiler de vivienda ³	60,3		Hogares beneficiarios de prestación	20.402
		Edificación de viviendas para el alquiler	8,1	68,4	Familias beneficiarias alquiler público	966
Educación	ODS 4	Becas no universitarias	30,3	45,6	Número de empleos creados	284
		Becas universitarias	15,3		Estudiantes beneficiarios de beca	78.909
Salud	ODS 3	Modernización del sistema sanitario	75	75	Empleos generados	725,4
Avance socioeconómico	ODS 1; ODS 5; ODS 10	Ayudas de emergencia social	23		Personas perceptoras de AES	50.548 ⁴
		Prestaciones de apoyo a la familia	30,8	137,1	Beneficiarios de ayudas a las familias ⁵	29.527
		Renta de Garantía de Ingresos	83,3		Personas perceptoras de RGI	11.020 ⁶

³ Incluye la financiación de la prestación complementaria de vivienda y de la prestación económica de vivienda (47.030 €), por un lado, y la financiación del programa BIZIGUNE (13.274€), por otro lado.

⁴ 9.410 prestaciones en Araba, 27.386 en Bizkaia y 13.752 en Gipuzkoa.

⁵ Abarca prestaciones a familias con hijos e hijas (15.396.122€ y 17.536 solicitudes abonadas) y ayudas para la conciliación de la vida familiar y laboral (15.385.000€ y 11.991 solicitudes).

⁶ 3.638 hombres y 7.382 mujeres.

Categoría de proyecto	ODS	Programas	Asignación programa (millones €)	Asignación Bono (millones €)	Indicadores de impacto		
					Indicador		Unidades
PROYECTOS Y PROGRAMAS VERDES							
Transporte limpio	ODS 9; ODS 11	Suministro de nuevas unidades de tren	26,2	128,3	Número de trenes sustituidos	5	
		Nuevas infraestructuras ferroviarias	57,1		Emisiones de CO2 evitadas (t/año)	161,06	
		Financiación operadores ferroviarios	45				
Prevención y control de la contaminación	ODS 11	Calidad del aire	1,3	2,4	Campañas de medición	24	
					Personas con información diaria	2.172.591	
		Calidad del suelo	0,3		Nuevas estaciones acreditadas	6	
					Consultas de empresas resueltas	870	
					Valoraciones de contaminación	1.036	
					Empresas receptoras de subvención	41	
	Protección del medio ambiente	0,8	Empleos creados	12,92			
Gestión sostenible agua y aguas residuales	ODS 6	Saneamiento y depuración del agua	12,1	16,9	Número de empleos creados	139,95	
		Mantenimiento, conservación, recuperación, restauración y mejora de cauces y márgenes de ríos y arroyos	2,9		Número de actuaciones	991	
					Hectáreas conservadas o restauradas	32	
			Red de seguimiento del estado de las masas de agua		1,9	Ríos evaluados	107

.../...

Categoría de proyecto	ODS	Programas	Asignación programa (millones €)	Asignación Bono (millones €)	Indicadores de impacto	
					Indicador	Unidades
Conservación biodiversidad terrestre y acuática	ODS 14; ODS 15	Gestión de la Red de Centros Ambientales	1	3,5	Número de visitantes	90.198
		Protección del capital natural	0,84		Estudios técnicos financiados	24
		Restauración y mejora de ecosistemas	0,74		Hectáreas con actuaciones	25.060
		Gestión Reserva Biosfera Urdaibai	0,92		Km itinerarios peatonales mejorados	79,4
Eficiencia energética	ODS 9	Ecodiseño y fabricación verde	1,2	1,5	Ahorro de materiales (t/año)	78.000
					Número de empleos creados	60
		Gestión de residuos	0,3		Número de jóvenes formados	21
					Variación tasa reciclaje escorias	+19%
					Variación tasa reciclaje RCDs	+3%
Energía renovable	ODS 7	Ayudas a la eficiencia energética y a las energías renovables	9,4	9,4	Variación tasa reciclaje municipio	+1%
					Proyectos subvencionados	878

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del análisis.

4.2. Impacto total en la producción, la renta y el empleo⁷

El cuadro nº 6 resume el impacto total sobre la producción la renta y el empleo de los 500 millones de €. Por columnas se recoge el impacto directo, indirecto, inducido y la suma de los tres anteriores. El multiplicador se refiere al efecto de arrastre sobre la producción y la renta generada por cada euro invertido en proyectos sostenibles, así como sobre los empleos creados por cada millón de euros invertidos.

Cuadro nº 6. IMPACTOS DE LAS INVERSIONES DERIVADAS DE LA EMISIÓN DE BONOS SOSTENIBLES

	IMPACTOS				
	Directos	Indirectos	Inducidos	TOTAL	Multiplicador
Producción (millones €)	500	245,9	97,3	843,3	1,69
Renta (millones €)	159,4		39,7	199,1	0,40
Empleo (número de empleos)	6.450		1.944	8.394	16,79

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del análisis.

Los resultados muestran que las inversiones derivadas de la emisión de bonos sostenibles generan un incremento de la producción total⁸ de alrededor de 843 millones de €. Al efecto directo (500 millones) hay que sumarle otros 246 millones de € generados por el efecto arrastre en los sectores productivos (impacto indirecto) y otros 97 millones de € por el aumento del consumo derivado del incremento de renta (impacto inducido). Por lo tanto, los impactos indirectos e inducidos juegan un papel fundamental que no debe obviarse, más aún cuando se observa que, en muchos casos, sus efectos son superiores a los efectos directos. Esto se visualiza con el multiplicador, el cual indica que cada euro gastado/invertido genera un aumento de la producción de 1,69€.

No obstante, el incremento de la producción no se transforma en su totalidad en renta disponible, pues una parte se destina a las importaciones o al pago de impuestos (Ansuategi *et al.*, 2014). De este modo, el impacto directo sobre la renta es menor, alrededor de 159 millones de €. A esto habría que añadir el impacto inducido, que alcanza los 40 millones de €. El efecto multiplicador es 0,40, lo que significa que cada euro invertido genera 0,40 euros de aumento de renta disponible.

⁷ En el Anexo nº 2 se encuentra la tabla que recoge la asignación de los 500 millones de euros por sectores (Cuadro nº 10).

⁸ Los datos deben ser interpretados con cautela, ya que las TIO corresponden a periodos diferentes. En concreto, las últimas TIO ofrecidas son del año 2015.

Los empleos creados ascenderían a 8.394, de los cuales 6.450 serían directos e indirectos y 1.944 inducidos. El efecto multiplicador es de 16,79, es decir, cada millón de euros invertidos genera 16,79 empleos.

Desagregando los impactos por ramas de actividad, los resultados muestran una tendencia similar: los impactos indirectos e inducidos son importantes y deben, por lo tanto, considerarse a la hora de poner en marcha una determinada política.

El cuadro nº 7 resume los impactos sectoriales sobre la producción. Las ramas donde se localizan los mayores incrementos son:

- Alquiler, inmobiliarias y servicios a empresas.
- Construcción.
- Transporte, almacenamiento y comunicaciones.
- Industria manufacturera.
- Producción y distribución de energía eléctrica, gas y agua.

Entre ellas representan casi el 76,02% del impacto total.

Cuadro nº 7. IMPACTOS SOBRE LA PRODUCCIÓN POR SECTORES ECONÓMICOS (millones de €)

	Directo	Indirecto	Inducido
Alquiler, inmobiliarias y servicios a empresas	107,1	40,4	24,8
Construcción	126,2	42,9	2,8
Transporte, almacenamiento y comunicaciones	97,5	35,8	8,1
Industria manufacturera	32,2	45,5	9,1
Producción y distribución de energía eléctrica, gas y agua	26,6	35,2	6,8
Comercio y reparación	8,7	19,3	14,0
Educación	30,4	1,8	2,6
Hostelería	18,9	2,7	13,2
Actividades sanitarias y veterinarias; servicios sociales	20,2	2,2	3,9
Intermediación financiera	5,4	12,5	4,0
Otras actividades sociales y servicios personales	8,1	2,7	5,9
Industrias extractivas	10,2	3,0	0,1
Agricultura, ganadería, caza, silvicultura	4,8	0,64	0,3
Administración pública	2,4	1,2	0,2
Pesca, acuicultura	1,3	0,1	0,1
Hogares que emplean personal doméstico	0	0	1,4

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del análisis.

Analizando por tipo de impacto, se observa que, en el caso de los impactos indirectos, destacan «Industrias manufactureras» y «Construcción» y «Alquiler, inmobiliarias y servicios a empresas». Esto responde a la lógica de que se trata de sectores dedicados a la producción de bienes intermedios que serán demandados por las industrias directamente financiadas por los bonos (especialmente por las que trabajen en el ámbito de la rehabilitación de viviendas, la construcción de nuevos medios de transportes o la instalación de energías renovables) y de sectores orientados a la prestación de servicios necesarios para, por ejemplo, el fomento de la formación de empleo o la elaboración de planes, campañas y proyectos de recuperación y mejora medioambiental, entre otros. Respecto a los impactos inducidos, son especialmente llamativos los casos de «Alquiler, inmobiliarias y servicios a empresas», «Comercio y reparación» y «Hostelería», lo cual es coherente, ya que hay que recordar que el impacto inducido es aquel que se genera por el efecto expansivo de la interacción renta-consumo. Cuanto mayor sea la renta de los hogares, mayor será su consumo de bienes y de servicios.

Como ya se ha explicado, el incremento de la demanda final de los sectores supondrá un aumento de la producción total vasca y, por ende, de su renta. Esto, a su vez tendrá efectos adicionales en el consumo de las familias, incrementando de nuevo con ello la demanda final. No obstante, como no todos los sectores productivos tienen la misma capacidad de generar renta, es necesario estimar específicamente los impactos sobre la renta. Los sectores económicos que generan mayores rentas⁹ (Cuadro nº 8) son:

- Alquiler, inmobiliarias y servicios a empresas (sobre todo, servicios de arquitectura e ingeniería e investigación y desarrollo)
- Transporte, almacenamiento y comunicaciones.
- Construcción.
- Hostelería.
- Industria manufacturera (sobre todo, construcción metálica, ingeniería mecánica, material de transporte y material y equipo eléctrico).

Estas actividades destacan por ser sectores muy especializados y que requieren profesionales altamente cualificados y que, por ende, tienden a generar rentas regionales elevadas.

⁹ En el Anexo nº 3 se encuentran los cuadros que recogen los coeficientes y los multiplicadores de renta y empleo, por ramas de producción (Cuadros nº 11 y 12).

Cuadro nº 8. IMPACTOS SOBRE LA RENTA POR SECTORES

(millones de €)

	Directo + Indirecto	Inducido
Alquiler, inmobiliarias y servicios a empresas	60,9	21,6
Transporte, almacenamiento y comunicaciones	29,8	6,4
Construcción	13,8	2,9
Hostelería	14,0	2,0
Industria manufacturera	9,3	2,4
Producción y distribución de energía eléctrica, gas y agua	9,0	1,5
Educación	6,4	0,6
Otras actividades sociales y servicios personales	5,0	0,4
Actividades sanitarias y veterinarias; servicios sociales	4,5	0,7
Comercio y reparación	4,1	1,0
Intermediación financiera	1,6	0,177
Agricultura, ganadería, caza, silvicultura	0,8	0,015
Pesca, acuicultura	0,2	0,001
Administración pública	0	0,003
Industrias extractivas	0	0,004
Hogares que emplean personal doméstico	0	0

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del análisis.

En cuanto al empleo (Cuadro nº 9), los sectores que más se verán favorecidos serán:

- Alquiler, inmobiliarias y servicios a empresas.
- Transporte, almacenamiento y comunicaciones.
- Construcción.
- Educación.
- Industria manufacturera.

Lógicamente, se trata de sectores a los que la Administración vasca ha dado especial importancia y que, por lo tanto, se beneficiarán directamente de la emisión de bonos sostenibles.

Cuadro nº 9. IMPACTOS SOBRE EL EMPLEO POR SECTORES

(número de empleos)

	Directo + Indirecto	Inducido
Alquiler, inmobiliarias y servicios a empresas	1.696	1.059
Transporte, almacenamiento y comunicaciones	1.312	315
Construcción	1.177	140
Educación	613	31
Industria manufacturera	469	118
Hostelería	321	32
Comercio y reparación	205	99
Actividades sanitarias y veterinarias; servicios sociales	195	72
Producción y distribución de energía eléctrica, gas y agua	145	49
Otras actividades sociales y servicios personales	117	19
Agricultura, ganadería, caza, silvicultura	82	1
Intermediación financiera	48	9
Administración pública	28	0
Industrias extractivas	25	0
Pesca, acuicultura	17	0
Hogares que emplean personal doméstico	0	0

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del análisis.

5. CONCLUSIONES

El mercado de bonos puede jugar un papel fundamental en materia climática y de sostenibilidad, y de hecho son bastantes ya las iniciativas que se están poniendo en marcha en todo el mundo para financiar proyectos de adaptación al cambio climático, mitigación y otras cuestiones relacionadas con la sostenibilidad. La emisión de bonos sostenibles para financiar proyectos verdes y socialmente responsables es un ejemplo que, aunque todavía limitado, representa el potencial de este instrumento. En el marco de la Agenda Euskadi Basque Country 2030, el GV-EJ emitió, en 2018, bonos sostenibles por valor de 500 millones de euros. El 67,58% de los fondos obtenidos fueron destinados a proyectos sociales, frente al 32,52% que se emplearon en cuestiones medioambientales. La categoría de avance socioeconómico, y en particular la Renta de Garantía de Ingresos, fue la partida que mayor financiación recibió, beneficiándose de ella 11.020 personas. Asimismo, 78.909 estudiantes (universitarios y no universitarios) recibieron una beca y 20.402 personas obtuvieron ayudas

para el alquiler de vivienda. Se ha mejorado también el reciclaje y se ha impulsado el ecodiseño creando empleo y formando a jóvenes. Se han ampliado, igualmente, el número de actuaciones en materia de saneamiento de agua y de restauración y mejora de ecosistemas y cauces de ríos.

Sin embargo, además de los impactos propios de cada proyecto financiado, los fondos obtenidos mediante la emisión de 500 millones tendrán un impacto sobre la producción, la renta y el empleo en Euskadi, ya que muchos sectores productivos se verán directamente beneficiados (como, por ejemplo, los relacionados con la rehabilitación de viviendas) y otros lo harán indirectamente por el efecto de arrastre de los primeros. Las TIO, que ha sido la metodología empleada, permiten desagregar el impacto total en impactos directos, indirectos e inducidos, ya que, al aumentar la demanda en un sector, se generará no solo un incremento en la producción de ese sector (efecto directo), sino también un incremento del consumo interno (demanda de *inputs*) por parte de ese sector, favoreciendo positivamente al resto de sectores, los cuales verán aumentada adicionalmente su demanda. Este incremento de la demanda total se traducirá en mayor renta para los consumidores, los cuales aumentarán consumo y, por ende, de demanda final. Los resultados indican que los impactos indirectos e inducidos representan una parte considerable del impacto total, por lo que deben incorporarse en cualquier análisis. Los sectores más beneficiados por esta emisión han sido «Alquiler, inmobiliarias y servicios a empresas», «Construcción», «Transporte, almacenamiento y comunicaciones», «Industria manufacturera», «Educación», «Hostelería» y «Producción y distribución de energía eléctrica, gas y agua». En definitiva, la emisión de bonos sostenibles ha beneficiado la estructura económica y social de Euskadi, generando renta y empleo, y sentando las bases para avanzar hacia el cumplimiento de las tres dimensiones necesarias para un desarrollo sostenible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABADIE, L.M.; GALARRAGA, I.; RÜBBELKE, D. (2013): «An analysis of the causes of the mitigation bias in international climate finance», *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(7): 943-955.
- ADIF (2018): «Green Bonds Annual Report 2018».
- ANSUATEGI, A.; ESCAPA, M.; GALARRAGA, I.; GONZÁLEZ-EGUINO, M. (2014): «Impacto económico de la eco-innovación en Euskadi. Una aproximación cuantitativa», *Ekonomiaz*, 86: 247-273.
- ASOCIACIÓN INTERNACIONAL DE MERCADOS DE CAPITAL (2017): «Los Principios de los Bonos Sociales 2017 - Social Bond Principles (SBP)».
- (2018): «Los Principios de los Bonos Verdes 2018 - Green Bond Principles (GBP)».
- BIRD, N.; BROWN, J.; SCHALATEK, L. (2011): «Design challenges for the Green Climate Fund», *Climate Finance Policy Brief No 4*, Heinrich Böll Stiftung North America.
- BUCHNER, B.; FALCONER, A.; HERVÉ-MIGNUCCI, M.; TRABACCHI, C.; BRINKMAN, M. (2011): «The Landscape of Climate Finance. A CPI Report», *Climate Policy Initiative*, 1-101.
- BUTZENGEIGER-GEYER, S.; MICHAELOWA, A.; KÖHLER, M.; STADELMANN, M. (2011): «Market mechanisms for adaptation to climate change: lessons from mitigation and a pathway to implementation», *Center for Comparative and International Studies (CIS) Working Paper 71*, ETH Zurich and University of Zurich.
- CAJA RURAL DE NAVARRA (2018): «Informe de sostenibilidad de la cartera crediticia».
- CARRARO, C.; MASSETTI, E. (2012): «Beyond Copenhagen: a realistic climate policy in a fragmented world», *Climate Policy*, 110: 523-542.
- COMUNIDAD DE MADRID (2017): «Sustainability Bond Allocation Reporting 2017».
- COPENHAGEN ACCORD (2009): «Report of the Conference of the Parties on its fifteenth session, held in Copenhagen from 7 to 19 December 2009», *Framework Convention on Climate Change*, United Nations.
- EUSTAT (2015): *Cuentas Económicas: Tablas Input-Output*, Instituto Vasco de Estadística, Vitoria-Gasteiz.
- FANKHAUSER, S.; BURTON, I. (2011): «Spending adaptation money wisely», *Climate Policy*, 11:1037-1049.
- FERNÁNDEZ, F.J.; GALARRAGA, X.; GONZÁLEZ, P., BHOGAL, P. (1999): «Evolución e Impacto socioeconómico del aeropuerto de Vitoria-Gasteiz», *Instituto de Economía Pública*, Universidad del País Vasco.
- FLANDERS STATE OF THE ART (2018): «Sustainability Bond Framework».
- GALARRAGA, I.; GONZÁLEZ-EGUINO, M.; MARKANDYA, A. (2009): «What happened during the climate change negotiations in Copenhagen 2009?», *BC3 Policy Briefings*.
- GALARRAGA, I.; MARKANDYA, A.; RÜBBELKE, D. (2017): «Challenges in Climate Finance», en Markandya, A.; Galarraga, I.; Rübberke, D. (eds.), *Challenges in Climate Finance*, World Scientific Publishing Company Pte Limited, 1-7.
- GOBIERNO VASCO (2018): «Agenda Euskadi Basque Country 2030», Vitoria-Gasteiz.
- (2019): «Impacto económico, ambiental y social del bono sostenible Euskadi 2018», Vitoria-Gasteiz.
- INTERNATIONAL FINANCE CORPORATION (2018): «Green Bond Impact Report. Financial Year 2018», *World Bank Group*.
- LARREA, I.; GALARRAGA, I.; SOLAUN, K. (2018): «Las finanzas del clima. Una revisión», *Ekonomiaz* 93: 247-266.
- NORDEA (2018): «Green Bond Impact Report. Nordea Bank Ab».
- OBSERVATORIO DE LA SOSTENIBILIDAD; AIS GROUP; FUNDACIÓN CIUDADANÍA (2019): «SOS 17X17 Análisis sobre la sostenibilidad en España 2019 en las 17 CC.AA.»
- PERSSON, Å.; KLEIN, R.J.T.; KEHLER SIEBERT, C.; ATTERIDGE, A.; MÜLLER, B.; HOFFMAISTER, J.; LAZARUS, M.; TAKAMA, T. (2009): «Adaptation Finance under a Copenhagen Agreed Outcome», *SEI research report*. Stockholm Environment Institute, Stockholm.

- PITTEL, K.; RÜBBELKE, D. (2013): «International climate finance and its influence on fairness and policy», *The World Economy*, 36(4): 419-436.
- REGIÓN ILE-DE-FRANCE (2017): «Projects financed by the 2017 green and sustainability bond».
- ROMÁN, M.V.; GALARRAGA, I. (2016): «The Paris Summit: The Beginning of the End of the Carbon Economy», *DYNA Energía y Sostenibilidad*, 5 (1): 4p.
- ROMÁN, M.V.; ANSUATEGI, A.; MARKANDYA, A. (2017a): «Climate Finance and International Negotiations on Climate Policy», en Markandya, A.; Galarraga, I.; Rübbelke, D. (eds.), *Climate Finance: Theory and Practice*, World Scientific Series on the Economics of Climate Change, 11-33.
- ROMÁN, M.V.; SANZ, M.J.; GALARRAGA, I. (2017b): «La COP de Marrakech confirma el compromiso mundial con la lucha del cambio climático», *DYNA Energía y Sostenibilidad*, 92.
- TRABACCHI, C.; BUCHNER, B. (2017): «Adaptation Finance: Setting the Ground for Post-Paris Action», en Markandya, A.; Galarraga, I.; Rübbelke, D. (eds), *Climate Finance: Theory and Practice*. World Scientific Series on the Economics of Climate Change, 35-54.
- UNFCCC (2014): «2014 Biennial Assessment and Overview of Climate Finance Flows», UNFCCC Standing Committee on Finance.
- WORLD BANK (2019): «World Bank impact report 2018».
- WUPPERTAL INSTITUT (2019): «Analysis of the Sustainability Bond #4 issued in 2018 by the German State of North Rhine-Westphalia».

ANEXO nº 1

METODOLOGÍA CUADROS *INPUT-OUTPUT*

En este Anexo se presenta el modelo *input-output* (I-O) de demanda (o modelo de Leontief) utilizado en este estudio.

Las TIO permiten representar empíricamente la estructura económica completa de la economía, al analizar las múltiples relaciones entre los sectores que la componen y las relaciones entre estos sectores y el resto de las economías con las que intercambian bienes y servicios (véase Fernández *et al.* (1999) para un análisis más detallado). Muestran la producción total de cada sector (*output*) y el destino de dicha producción (parte de ella será adquirida por el resto de los sectores – *inputs* – para utilizarla en su propio proceso productivo). Por ello, el modelo I-O permite estimar los cambios en la producción ante cambios en la demanda final.

La identidad contable que se cumple para todos los sectores j es la siguiente:

$$q_j = x_{1j} + x_{2j} + \dots + x_{nj} + y_j \quad \forall j \in (1, \dots, n) \quad [1]$$

donde q_j es la producción del sector j -ésimo, y_j la demanda final del sector j -ésimo (suma del consumo privado y público, formación bruta de capital y exportaciones) y x_{ij} los flujos del sector i -ésimo al sector j -ésimo (consumo intermedio). n es el número de ramas de producción.

En términos matriciales:

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \dots & x_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad [2]$$

o lo que es lo mismo:

$$q_i = X_i + y \quad [3]$$

donde $q_1 = x_{11} + \dots + x_{1n} + y_1$; $q_n = x_{n1} + \dots + x_{nn} + y_n$ y X es la matriz de transacción interindustrial (Ansuategi *et al.* 2014).

A partir de [3], se puede calcular la matriz de coeficientes técnicos que recoge el porcentaje que representa cada *input* sobre la producción final. Al existir una relación entre el sector vendedor i y el sector comprador j :

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}}{q_j} \quad [4]$$

el modelo quedaría de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad [5]$$

o lo que es lo mismo:

$$q = Aq + y \quad [6]$$

donde la matriz A es la matriz de coeficientes técnicos, q el vector de producción total e y el vector de la demanda final. Cada coeficiente de la matriz, $[a_{ij}]$, mide la producción del sector j que proviene del sector i .

A partir de la matriz de coeficientes técnicos, se obtiene la ecuación básica del modelo –la matriz inversa de Leontief–. Para ello,

$$q - Aq = y \quad [7]$$

$$[I - A]q = y \quad [8]$$

donde I es una identidad. Despejando q :

$$q = [I - A]^{-1}y = By \quad [9]$$

donde B es la matriz inversa de Leontief. Los coeficientes de esta matriz, $[b_{ij}]$ recogen el efecto multiplicador producido en el conjunto de la economía cuando se incrementa la demanda final (Fernández *et al.*, 1999): cada coeficiente indica la cantidad adicional que el sector i necesita producir para satisfacer el aumento de una unidad adicional en la demanda final del sector j . Cada elemento de la diagonal principal es mayor que 1 ($b_{ij} > 1$), puesto que recoge tanto el efecto directo del aumento de la demanda sobre la producción de su propio sector como los efectos indirectos generados sobre otros sectores (Ansuategi *et al.*, 2014).

$$B = [I - A]^{-1} = I + A + A^2 + A^3 + \dots \quad [10]$$

Por lo tanto, los coeficientes de esta matriz B recogen directamente los multiplicadores sobre la producción. En cambio, para poder obtener los coeficientes sobre la renta y el empleo (efectos multiplicadores), habría que multiplicar dicha matriz por los coeficientes asociados a dichos indicadores.

El multiplicador del impacto sobre el empleo viene dado por:

$$ML = \gamma B \quad [11]$$

donde γ es el vector de coeficientes de empleo que toman la siguiente forma:

$$\gamma_i = \frac{L_i}{q_i} \quad [12]$$

donde L_i es el empleo del sector i -ésimo. Los mismos pasos se seguirían para la renta.

No obstante, este modelo no tiene en cuenta el sector familias como un sector más, por lo que no permite visualizar la interacción renta-consumo. Para incluirlo, se debe ampliar la matriz X con una nueva fila (renta total disponible RD) y una nueva columna (consumo privado CF), tal que:

$$q^* = X_i^* + y^* \quad [13]$$

$$X^* = \begin{bmatrix} X & CF \\ RD & 0 \end{bmatrix} \quad y \quad A^* = \begin{bmatrix} A & cf \\ rd & 0 \end{bmatrix} \quad [14]$$

donde X^* y A^* son la matriz intersectorial y la matriz de coeficientes técnicos ampliados, respectivamente, y donde:

$$cf = \left[cf_i = \frac{CF_i}{q_F} \right] \quad y \quad rd = \left[rd_i = \frac{RD_i}{q_i} \right]' \quad [15]$$

Siguiendo los mismos pasos que se han realizado anteriormente, se obtiene que:

$$q^* = [I_{n+1} - A]^{-1} y^* = B^* y^* \quad [16]$$

tal que:

$$B^* = [I_{n+1} - A]^{-1} = [b_{ij}] \quad [17]$$

donde b_{ij} representa la renta adicional generada en el sector i si la demanda del sector j aumenta en una unidad:

$$B^* = \begin{bmatrix} B^p & s \\ b^f & v \end{bmatrix} \quad [18]$$

donde b_{ij}^p mide la cantidad adicional producida por el sector i -ésimo si la demanda final del sector j -ésimo aumenta en una unidad y b_{ij}^f es la renta adicional generada en el sector i -ésimo si la demanda final del sector j -ésimo se aumenta en una unidad. A partir de aquí, se obtienen los multiplicadores de impacto.

- **Multiplicador del impacto económico global sobre la producción.** Para el sector j , el multiplicador se calcula como la suma de los elementos de una columna de la matriz de multiplicadores de la producción:

$$MP_j = \sum_{i=1}^n b_{ij}^p = B^p \quad [19]$$

- **Multiplicador del impacto económico global sobre el empleo.** El procedimiento es igual que en los casos anteriores, tal que:

$$ML_j = \sum_{i=1}^n \gamma_i b_{ij}^p = \gamma B^p \quad [20]$$

Así, se obtiene el empleo total generado, dentro del territorio, ante un aumento de la demanda del sector j en una unidad.

- **Multiplicador del impacto económico global sobre la renta:** se multiplica cada elemento de la matriz B^* por los coeficientes de renta r_j , tal que:

$$MR_j = \sum_{i=1}^n r_i b_{ij}^p = b^f \tag{21}$$

Así, se obtiene la renta total generada, dentro del territorio, ante un aumento de la demanda del sector j en una unidad.

ANEXO nº 2
ASIGNACIÓN DE FONDOS POR SECTORES

Cuadro nº 10. ASIGNACIÓN DE FONDOS POR SECTORES	
	(millones de €)
	Asignación
Construcción	126,2
Alquiler, inmobiliarias y servicios a empresas	107,1
Transporte, almacenamiento y comunicaciones	97,5
Industria manufacturera	32,2
Educación	30,4
Producción y distribución de energía eléctrica, gas y agua	26,6
Actividades sanitarias y veterinarias y servicios sociales	20,2
Hostelería	18,9
Industrias extractivas	10,2
Comercio y reparación	8,7
Otras actividades sociales y servicios personales	8,1
Intermediación financiera	5,4
Agricultura, ganadería, caza y selvicultura	4,8
Administración pública	2,4
Pesca y acuicultura	1,3
Hogares que emplean personal doméstico	0

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del análisis.

ANEXO nº 3

COEFICIENTES Y MULTIPLICADORES DE RENTA Y EMPLEO

Cuadro nº 11. COEFICIENTES Y MULTIPLICADORES DE LA RENTA Y MULTIPLICADORES DE LA RENTA PARA EL MODELO AMPLIADO A LAS FAMILIAS

	Coeficientes renta	Multiplicador renta	Multiplicador renta ampliado
Agricultura, ganadería, caza, silvicultura	0,152921757	0,163009898	0,166151452
Pesca, acuicultura	0,180056783	0,182297859	0,183115274
Industrias extractivas	0,000530833	0,002335072	0,002712523
Industria manufacturera	0,034317986	0,288531167	0,363097334
Producción y distribución de energía eléctrica, gas y agua	0,120175368	0,336447576	0,391834216
Construcción	0,036994485	0,109143317	0,131902285
Comercio y reparación	0,357652532	0,474815084	0,589232503
Hostelería	0,716288231	0,740933014	0,848353849
Transporte, almacenamiento y comunicaciones	0,141502693	0,306000762	0,372021556
Intermediación financiera	0,194354933	0,285237174	0,318136685
Alquiler, inmobiliarias y servicios a empresas	0,282980018	0,568737616	0,770771109
Administración pública	0,005453749	0,011098351	0,0125635
Educación	0,197725871	0,209308836	0,230118335
Actividades sanitarias y veterinarias; servicios sociales	0,199995721	0,221918045	0,254019588
Otras actividades sociales y servicios personales	0,573805919	0,616278652	0,664345967
Hogares que emplean personal doméstico	0,671993864	0,671993864	0,683516733

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del análisis.

Cuadro nº 12. COEFICIENTES Y MULTIPLICADORES DE EMPLEO, MULTIPLICADORES DE EMPLEO Y MULTIPLICADORES DE EMPLEO PARA EL MODELO AMPLIADO A LAS FAMILIAS

	Coeficientes empleo	Multiplicador empleo	Multiplicador empleo ampliado
Agricultura, ganadería, caza, silvicultura	0,01667231	0,01713401	0,01728778
Pesca, acuicultura	0,01356559	0,013604831	0,013644841
Industrias extractivas	0,002208483	0,002441809	0,002460284
Industria manufacturera	0,003667001	0,014544085	0,018193874
Producción y distribución de energía eléctrica, gas y agua	0,001029657	0,007330096	0,010041105
Construcción	0,005394811	0,009323786	0,010437769
Comercio y reparación	0,011858628	0,016683222	0,02228361
Hostelería	0,009775738	0,010883408	0,016141334
Transporte, almacenamiento y comunicaciones	0,005698381	0,013466657	0,016698176
Intermediación financiera	0,005295327	0,008939618	0,01054995
Alquiler, inmobiliarias y servicios a empresas	0,005881484	0,015824647	0,025713577
Administración pública	0,011675912	0,011870428	0,011942143
Educación	0,019707595	0,020127019	0,021145581
Actividades sanitarias y veterinarias; servicios sociales	0,014695006	0,015874252	0,017445526
Otras actividades sociales y servicios personales	0,013147511	0,014404942	0,016757692
Hogares que emplean personal doméstico	0,04585502	0,04585502	0,04641903

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del análisis.

La adaptación del sector energético al cambio climático¹

Adapting the energy sector to climate change

El cambio climático afectará al sector energético global, y también al español, tanto de forma directa como indirecta. Así, el cambio climático inducirá directamente cambios en la demanda energética, o alteraciones en la operación de las centrales de producción. Pero también afectará a la disponibilidad de agua o de otros recursos, lo que a su vez tendrá influencia en la oferta y demanda de energía. Este artículo propone un marco conceptual para analizar estos impactos directos e indirectos, revisa la literatura internacional, presenta estimaciones aplicables al contexto español, y formula propuestas para la adaptación de este sector estratégico.

Klima-aldaketak globalki eragingo dio energiaren sektoreari, baita Espainiakoari ere, zuzenean nahiz zeharka. Klima-aldaketaren arabera, aldatu egingo da energiaren eskaera, edo alterazioak izango ditu ekoizpen-zentraletako jardunak. Baina, gainera, ura edo bestelako baliabideak inguratzeari ez da izango erraza, eta, horren eraginez, energiaren eskaintza eta eskaera ere aldatu egingo dira. Artikulu honetan zuzeneko nahiz zeharkako eraginak ulertzeko testuinguru kontzeptuala proposatuko dugu, beste herrialdetan honen inguruan idatzita dutena aztertuko dugu, Espainiako testuinguruan aplikatu daitezkeen estimazioak azalduko ditugu eta sektore estrategiko hau behar bezala egokitzeko proposamenak formulatuko ditugu.

Climate change will affect the global and also the Spanish energy sector, both directly and indirectly. Thus, climate change will directly induce changes in energy demand, or alterations in the operation of production plants. But it will also affect the availability of water or other resources, which in turn will influence the supply and demand of energy. This article proposes a conceptual framework to analyse these direct and indirect impacts, reviews international literature, presents estimates applicable to the Spanish context, and formulates proposals for the adaptation of this strategic sector.

¹ Este trabajo presenta un resumen de un informe más amplio elaborado por los autores para la Oficina Española de Cambio Climático (Girardi *et al.*, 2015), a la que agradecemos su financiación parcial de la investigación realizada.

Índice

1. Introducción
2. Marco conceptual
3. Impactos en los sistemas energéticos
4. Caso español
5. Propuestas de adaptación

Referencias bibliográficas

Palabras clave: adaptación, energía, cambio climático.

Keywords: adaptation, energy, climate change.

Nº de clasificación JEL: Q54, Q40

Fecha de entrada: 06/03/2020

Fecha de aceptación: 12/05/2020

1. INTRODUCCIÓN

Desde finales del siglo XX, después de la creación del IPCC en 1988, la celebración de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en 1992 y la ratificación del Protocolo de Kioto en la COP-3 (Tercera Conferencia de la Partes) en 1997, la comunidad científica se ha volcado en el problema del cambio climático.

De entre las diversas maneras de afrontar el problema, aunque la mitigación (reducción de emisiones) copaba la gran mayoría de los esfuerzos, la estrategia de adaptación emergió como una forma importante y necesaria de gestionar el cambio climático. Poco a poco, gracias a la conciencia de que no podemos evitar sus consecuencias en su totalidad, la comunidad internacional ha comenzado a asumir la adaptación como una parte central de la estrategia global contra el cambio climático. Gracias a esto, en la actualidad disponemos de una amplia literatura científica sobre adaptación, aunque hay que seguir trabajando en la estimación de los impactos, sobre todo a nivel regional-nacional.

El Grupo de Trabajo II (WGII) es el grupo de trabajo del IPCC que evalúa la vulnerabilidad de los sistemas socioeconómicos y naturales al cambio climático, sus consecuencias y las opciones para adaptarse a él. Esta evaluación es general, no se centra solo en los sistemas de energía, sino que cubre todos los sectores que podrían verse afectados por el cambio climático, como los recursos hídricos, los ecosistemas, la agricultura y los bosques, los sistemas costeros, la industria y la salud humana, entre otros. Todos estos análisis son abordados en el 5º Informe de Evaluación (AR5) del IPCC (2014), el informe más completo hasta la fecha acerca de esta problemática, y donde se da cuenta de las diferentes soluciones existentes y las posibilidades de adaptación sectoriales existentes. No obstante, aunque sí es el más importante, el IPCC no es el único grupo de expertos dedicado a adaptación. Muchos otros investigadores también se dedican a esta cuestión, y algunos se han centrado específicamente en las implicaciones sobre el sector energético (un buen ejemplo es Ebinger, 2011, o EEA, 2019). Son estos los que han servido de base al presente trabajo.

La referencia indirecta a la importancia del sector energético en el informe AR5 es permanente. Pero también hay algunas referencias directas. Según el AR5 (evidencia robusta, grado alto de acuerdo), el cambio climático tendrá los siguientes efectos en la *demanda energética*:

- Se reducirá la demanda en calefacción de los hogares.
- Se incrementará la demanda en refrigeración de los hogares.

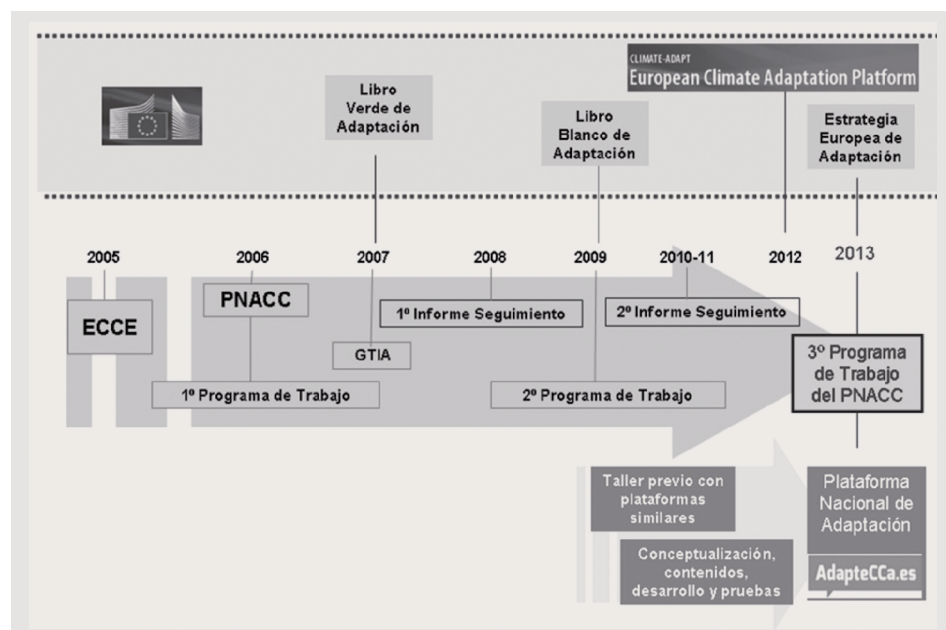
También hace hincapié el AR5 en que el efecto sobre las *fuentes energéticas* y las *tecnologías* afectará de manera diferente según los recursos primarios, los procesos tecnológicos y las ubicaciones.

En su análisis regional para Europa, el AR5 también destaca el problema de las restricciones de agua en zonas del sur de Europa, lo que conllevará, entre otros, problemas energéticos derivados de la disminución de la capacidad de generación hidráulica.

Por otro lado, dentro del apartado C, dedicado al manejo de los riesgos futuros y el incremento de la resiliencia, de nuevo se hace referencia al sector energético, concretamente a las importantes sinergias existentes entre este sector y otros como el agua, el suelo y la biodiversidad. Se destaca que las interacciones complejas entre todos ellos son importantes, aunque las herramientas para comprenderlas aún no están lo suficientemente desarrolladas. A modo de ejemplo, destaca acciones que suponen co-beneficios como (1) la mejora en la eficiencia energética y la apuesta por fuentes de energía más limpias, lo que redundará en disminución de las emisiones y en reducción de efectos dañinos sobre la salud de las mismas, o (2) la reducción en el consumo energético y de agua en zonas urbanas mediante la «transformación verde» de las ciudades y el reciclado de aguas.

A nivel español, el hito principal en cuestión de adaptación al cambio climático ha sido la elaboración del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) cuyo primer programa de trabajo se aprobó en 2006, y que en mayo de 2020 ha sido actualizado para el período 2021-2030. Se trata de un programa que vino a su vez precedido por los trabajos del ECCE (Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático). La génesis completa del PNACC se recoge en el gráfico nº 1.

Gráfico nº 1. **HITOS DE LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA UE Y EN ESPAÑA ENTRE 2005 Y 2013**



Fuente: Elaboración propia.

El objetivo general del PNACC es «promover la acción coordinada y coherente frente a los efectos del cambio climático en España con el fin de evitar o reducir los daños presentes y futuros derivados del cambio climático y construir una economía y una sociedad más resilientes».

Para ello, plantea nueve objetivos específicos, estando varios de ellos asociados a la evaluación de los impactos, la adaptación y la vulnerabilidad al cambio climático para cada sector. De entre todos estos sectores, uno de los más importantes desde el punto de vista de las sinergias que presenta con el resto, es el sector energético.

Queda de manifiesto por tanto la importancia que el PNACC otorga al sector energético, principalmente por el alto grado de interrelaciones con otros sectores

claves, algo que además hace particularmente complejo su análisis. Si bien algunos aspectos ya han sido considerados por otros estudios, como por ejemplo la influencia del cambio climático a través de la disponibilidad de agua, o estimaciones de la demanda de energía, faltan por analizar aún algunos elementos en detalle, y además hacerlo desde un marco integrado y coherente para España.

Este trabajo pretende analizar, con carácter exploratorio y preliminar, las consecuencias del cambio climático sobre el sector energético español, y más concretamente los efectos del mismo sobre la oferta y la demanda de energía en nuestro país. El estudio pretende identificar los análisis ya realizados y recopilar el conocimiento existente sobre esta cuestión a nivel internacional en general y su aplicación a España en particular.

El texto se organiza de la siguiente manera: el apartado 2 presenta el marco conceptual de adaptación al cambio climático en el sector energético que guía todo el trabajo. A continuación, el apartado 3 desgana este marco describiendo someramente los impactos directos e indirectos del cambio climático sobre los sistemas energéticos. El apartado 4 se centra en describir el caso español y, finalmente, el apartado 5 incluye algunas de las propuestas concretas de adaptación presentes en la literatura.

2. MARCO CONCEPTUAL

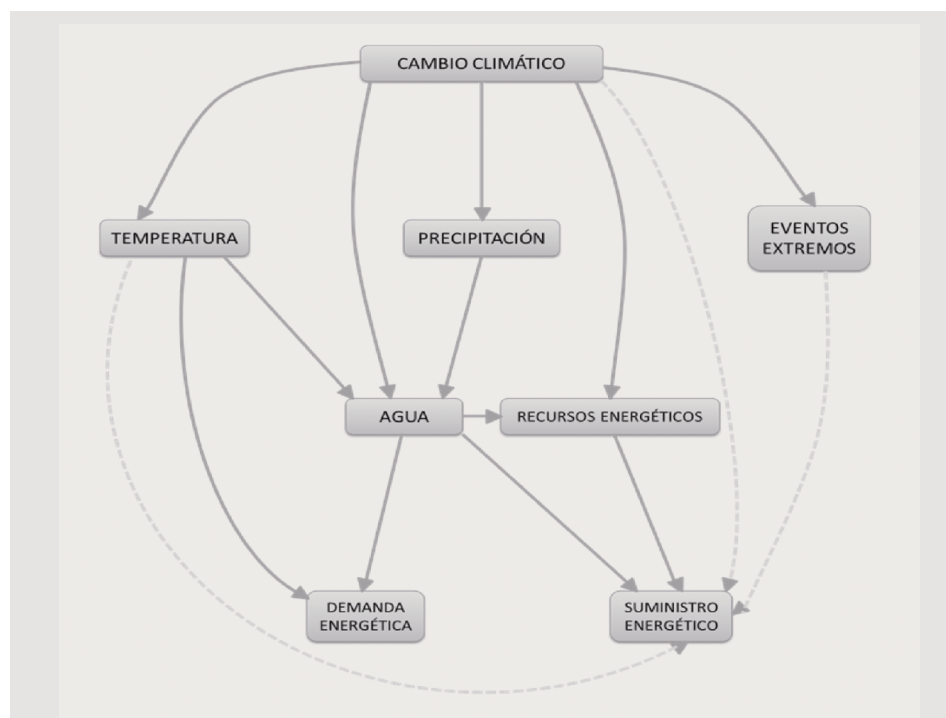
Como se ha comentado en la introducción, ante el creciente reconocimiento de que el cambio climático está en marcha y plantea graves riesgos para las sociedades humanas y los sistemas naturales, es necesario adoptar medidas que contemplen las estrategias nacionales de adaptación al cambio climático en aquellos sectores estratégicos más vulnerables. Ese es uno de los objetivos del PNACC desarrollado por la OECC, el cual, de entre todos los sectores, destaca al energético como uno de los prioritarios.

Para poder avanzar de forma ordenada en este análisis, el primer paso que se consideró fue crear un marco conceptual para el estudio de la adaptación al cambio climático en el sector energético, basado en la literatura científica (p.ej. Ebingger, 2011, o EEA, 2019). El gráfico nº 2 presenta este marco, en el cual pueden verse las diferentes relaciones que existen entre el cambio climático y el sistema energético.

Como se puede apreciar, el marco se divide en dos partes. Por un lado, la parte superior se centra en los sistemas físicos: se tienen en cuenta las principales tendencias climáticas que constituyen el cambio climático, a saber, los cambios en la temperatura, las precipitaciones y los fenómenos extremos. Por otro lado, la parte inferior se refiere a los impactos que el cambio climático y sus consecuencias producen en todos los sectores que constituyen un sistema de energía. Esta será la sección principal de este trabajo, que se abordará a continuación. Es importante

notar que en esta parte se considera el agua como *input* relevante del sistema de energía. Se hace así por tratarse esta de un recurso fundamental tanto para la demanda de energía como para la oferta. Agua y energía están vinculados a través de numerosas vías, como bien muestran los trabajos de Khan *et al.* (2016). Muchas fuentes de energía requieren cantidades significativas de agua y producen una gran cantidad de aguas residuales que requieren energía para su tratamiento. Por todo ello, los sistemas de energía deben ser gestionados teniendo en cuenta a su vez el agua y su gestión.

Gráfico nº 2. **MARCO GENERAL DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SECTOR ENERGÉTICO**



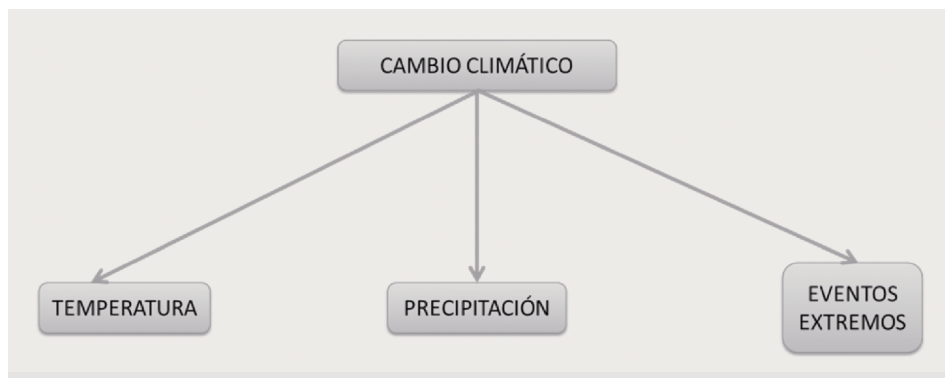
Fuente: Elaboración propia.

3. IMPACTOS EN LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS

3.1. Impactos físicos

El punto de partida de toda evaluación de los impactos del cambio climático sobre el sistema de energía es la evaluación de los impactos físicos en los sistemas naturales.

Gráfico n° 3. **MARCO GENERAL. IMPACTOS FÍSICOS**



Fuente: Elaboración propia.

Hay un elevado acuerdo y una evidencia robusta de que el cambio climático se está produciendo y que está afectando a los sistemas naturales, físicos y humanos. Las observaciones de los cambios en el sistema climático y su magnitud son especialmente importantes para la adaptación, debido a que los grandes cambios del sistema físico son a su vez los motores de cambio sobre el sistema energético. Estas fuerzas motoras pueden ser agrupadas en tres grandes efectos climáticos: (1) el cambio de temperaturas, (2) el cambio de patrón de las precipitaciones y (3) el cambio de la frecuencia e intensidad de eventos extremos. Es importante analizarlas con algo de detalle, pues serán estas las fuerzas motrices de los impactos sobre todo el sistema energético.

3.1.1. *Cambios en la temperatura*

Cada una de las tres últimas décadas ha sido, sucesivamente, más caliente en la superficie de la Tierra que cualquier década anterior desde 1850. El efecto más claro del cambio climático tiene que ver con ello, es decir, con un aumento de la temperatura media en la casi totalidad del mundo. Este aumento de temperatura se puede observar en varios elementos que constituyen el sistema natural, como la atmósfera, la tierra, el océano, los ríos, los lagos y los glaciares.

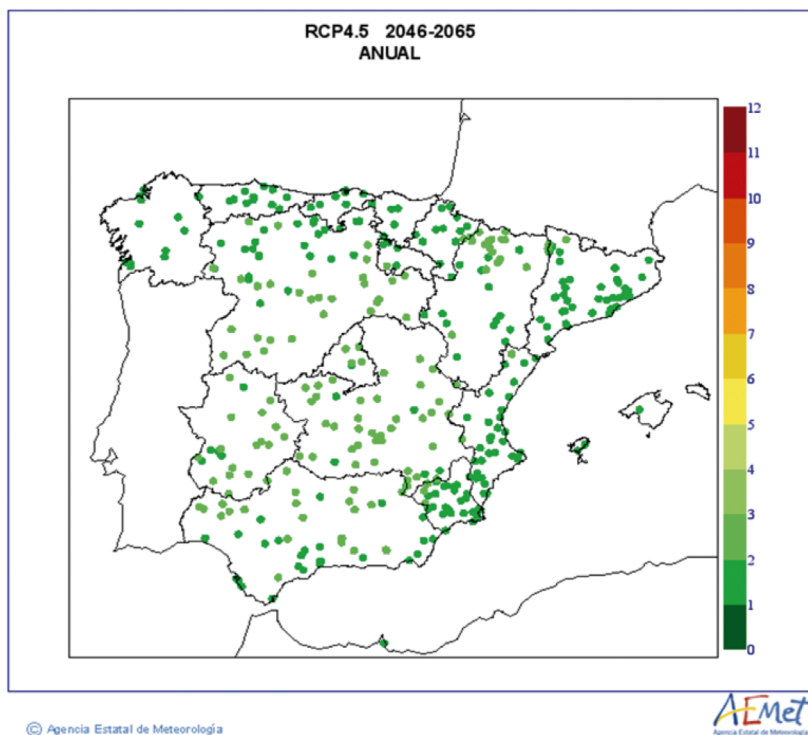
Para apreciar la intensidad media de este calentamiento, los investigadores sopesan algunos parámetros, como la temperatura media global de la superficie, la temperatura atmosférica libre, la temperatura de la troposfera y la temperatura del océano. A excepción de algunos casos particulares, todas las proyecciones ponen de manifiesto con evidencia robusta el calentamiento global.

El promedio global de la temperatura de la superficie de la tierra y el océano combinados ha aumentado 0,85°C durante el período de 1880 a 2012. Respecto a los océanos, el calentamiento es más grande cerca de la superficie: los primeros 700 m

de columna de agua en los océanos se han calentado a un ritmo de $0,11^{\circ}\text{C}$ por década durante el período 1971-2010, lo que supone más de un 60% del aumento neto de energía en el sistema climático.

Para los próximos años, en España tenemos las proyecciones regionalizadas desarrolladas por la AEMET, todas ellas disponibles de forma abierta (AEMET, 2019). A modo de ejemplo se incluye el gráfico nº 4, que presenta el incremento proyectado en la temperatura en el escenario el RCP4.5 en el período 2046-2065 y el gráfico nº 5, que presenta el incremento proyectado en la temperatura en el escenario el RCP8.5 en el período 2081-2100.

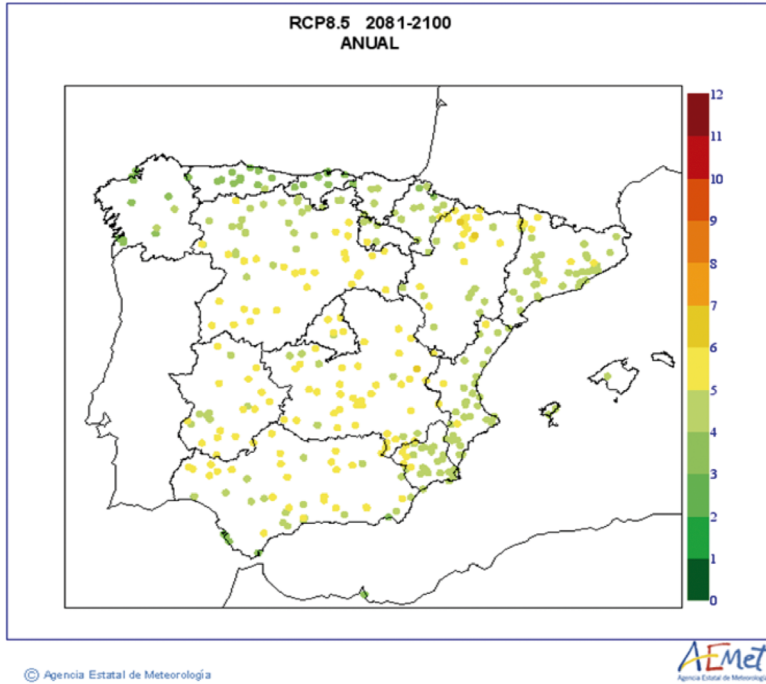
Gráfico nº 4. **PROYECCIONES REGIONALIZADAS DE LA AEMET PARA ESPAÑA. AUMENTO DE LA TEMPERATURA MEDIA ANUAL SEGÚN EL RCP4.5 EN EL PERIODO 2046-2065**



Nota: en la versión digital está disponible a color. www1.euskadi.net/ekonomiaz

Fuente: AEMET.

Gráfico nº 5. **PROYECCIONES REGIONALIZADAS DE LA AEMET PARA ESPAÑA. AUMENTO DE LA TEMPERATURA MEDIA ANUAL SEGÚN EL RCP8.5 EN EL PERIODO 2081-2100**



Nota: en la versión digital está disponible a color. www1.euskadi.net/ekonomiaz

Fuente: AEMET.

Se observa que, en el escenario RCP8.5, el más extremo, el aumento puede alcanzar los 5 o 6 grados en zonas del interior de la meseta y el norte de Aragón.

3.1.2. *Cambios en las precipitaciones*

El patrón de precipitaciones ha cambiado significativamente en el siglo XX. Se estima que en las latitudes medias del hemisferio norte la precipitación ha aumentado desde 1901, y especialmente después de 1951. Sin embargo, un análisis detallado de la influencia humana en los cambios en los patrones de precipitaciones es difícil de hacer con los registros existentes. En la actualidad existe confianza media² en que ha habido una influencia humana significativa en los cambios a escala global en los patrones de precipitación, especialmente en el hemisferio norte (latitudes medias y altas).

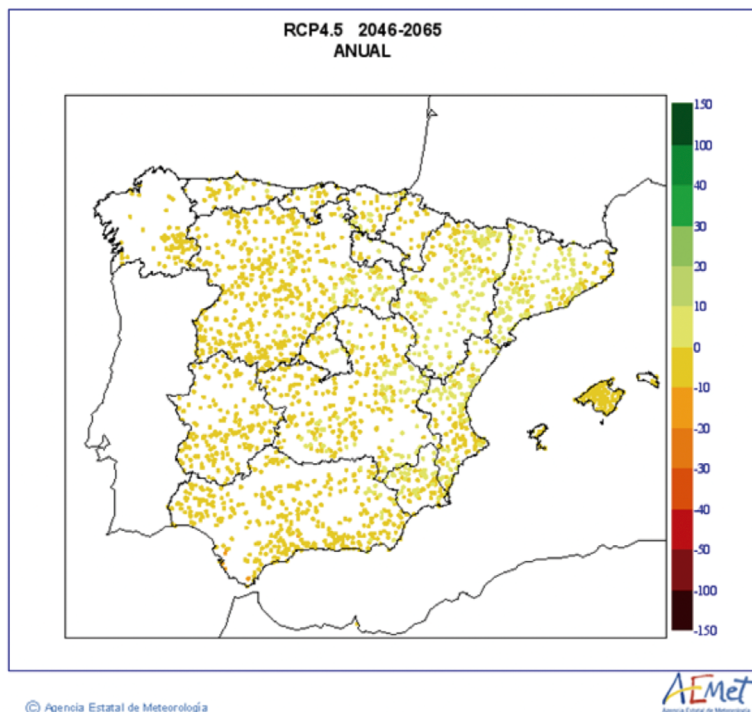
² Una de las métricas en las que se basa el AR5 es la confianza (*confidence*) en la validez de un hallazgo, basada a su vez en el tipo, la cantidad, la calidad y consistencia de la evidencia.

De cara al futuro, las proyecciones sí muestran un aumento claro de la precipitación más marcado en función de la latitud. En términos generales, las precipitaciones medias anuales aumentarán en las latitudes altas y disminuirán en las medias, ámbito en el que se encuentra nuestro país.

Con respecto a las concreciones para España, de nuevo la referencia son los estudios de regionalización llevados a cabo por la AEMET.

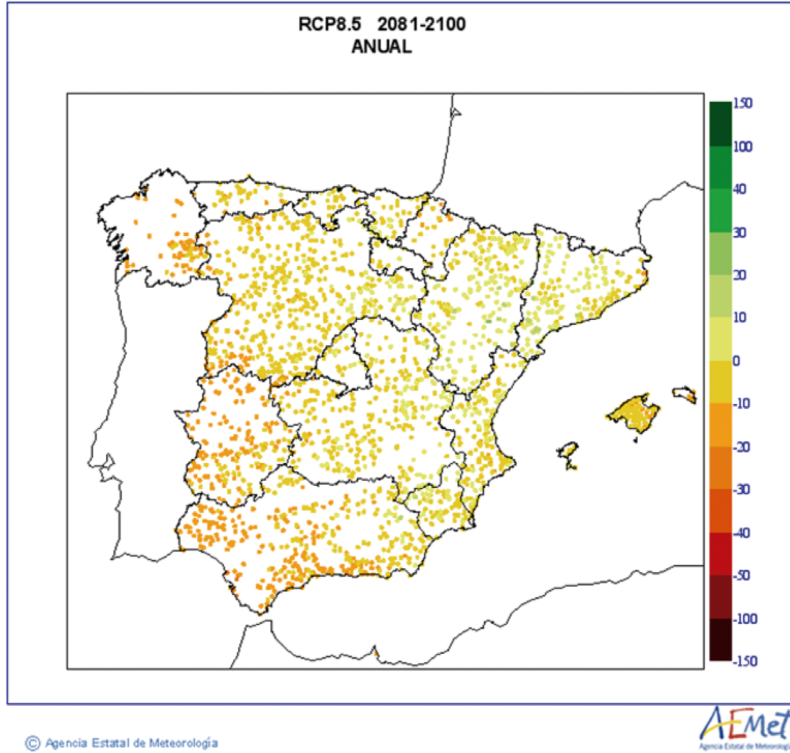
Aunque todas las proyecciones sobre cambios esperados en las precipitaciones están accesibles en la web de la AEMET, incluimos a modo de ejemplo, como hicimos con la temperatura, por un lado el gráfico nº 6, que presenta los resultados para el escenario RCP4.5 en el periodo 2046-2065 y, por otro lado, el gráfico nº 7, que presenta los resultados para el escenario RCP8.5 en el periodo 2081-2100, el más extremo, el cual, como se puede observar, incluye descensos superiores al 15% en el suroeste de la Península.

Gráfico nº 6. **PROYECCIONES REGIONALIZADAS DE LA AEMET PARA ESPAÑA. CAMBIO EN LAS PRECIPITACIONES SEGÚN EL RCP4.5 EN EL PERIODO 2046-2065**



Nota: en la versión digital está disponible a color. www1.euskadi.net/ekonomiaz
Fuente: AEMET.

Gráfico nº 7. **PROYECCIONES REGIONALIZADAS DE LA AEMET PARA ESPAÑA. CAMBIO EN LAS PRECIPITACIONES SEGÚN EL RCP8.5 EN EL PERIODO 2081-2100**



Nota: en la versión digital está disponible a color. www1.euskadi.net/ekonomiaz

Fuente: AEMET.

Estos datos de precipitaciones se complementan con los estudios del CEDEX (2010 y 2012) sobre la escorrentia. El cuadro nº 1 muestra las proyecciones de los cambios porcentuales en la misma en 2050, tomando la media del periodo 2041-2070. Estos estudios de CEDEX trabajan a su vez sobre escenarios de cambio climático del AR4³.

Vemos que, en el escenario más desfavorable (2), la reducción de la escorrentia en algunas demarcaciones hidrográficas del suroeste peninsular alcanza el 58 %.

³ El escenario 1 de cambio climático corresponde al escenario A2i, CGCM2-FIC del estudio del CEDEX, mientras que el escenario 2 corresponde al escenario A2ii, ECHAM4-FIC. El primer término (A2i o A2ii) se refiere al escenario original de cambio climático procedente del IPCC, y el segundo (CGCM2-FIC o ECHAM4-FIC) en función del modelo de circulación general de la atmósfera empleado para generar los. Así, el escenario 1 es un escenario de cambio climático medio, y el escenario 2 es un escenario severo.

Cuadro nº 1. VARIACIÓN INTERPOLADA DE LA ESCORRENTÍA EN ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO (% , MEDIA 2041-2070)

Demarcación hidrográfica	Variación de la escorrentía (%) (2041-2070)		Variación del recurso disponible (%) (2041-2070)	
	1	2	1	2
Galicia Costa	-4	-31	-14	-37
Miño-Sil	-6	-34	-11	-28
Cantábrico Occidental	-4	-27	-20	-38
Cantábrico Oriental	-2	-24	-11	-34
Duero	-13	-41	-10	-37
Tajo	-16	-48	-13	-50
Guadiana	-23	-58	-19	-58
Tinto, Odiel Y Piedras	-23	-58	-8	-65
Guadalquivir	-18	-55	-7	-55
Guadalete y Barbate	-18	-55	-12	-56
Cuencas Mediterráneas Andaluzas	-15	-50	-13	-41
Segura	-10	-39	-11	-44
Júcar	-11	-28	-11	-32
Ebro	-6	-26	-14	-27
Distrito Fluvial de Cataluña	-2	-5	-5	-11

Fuente: CEDEX.

3.1.3. Eventos extremos

Desde 1950 se han observado cambios en muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos⁴. Estos episodios graves aparecen en diferentes formas, y afectan a la temperatura, a las precipitaciones y a la circulación atmosférica.

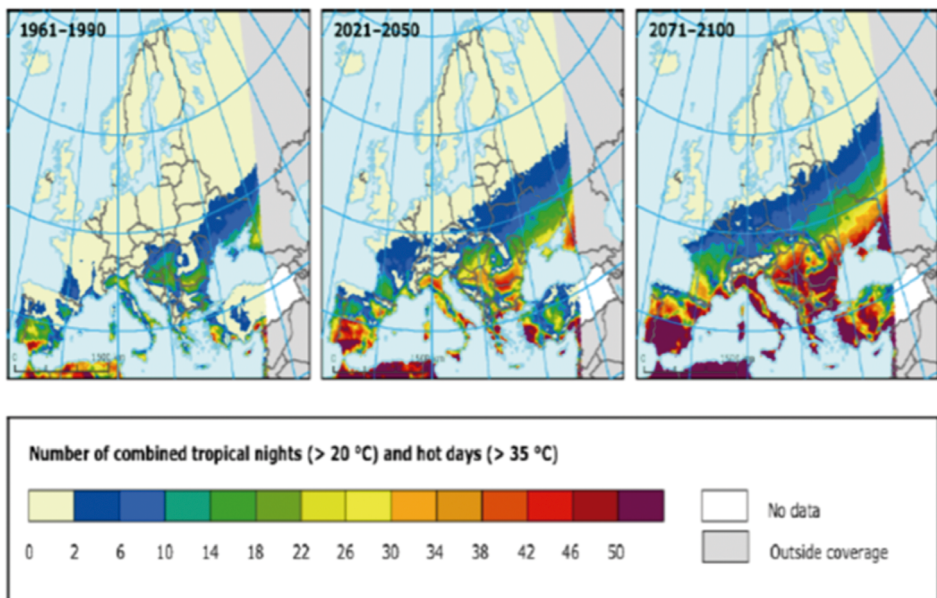
Los días y las noches fríos ha disminuido, y los días y las noches cálidos se han incrementado a escala global. La frecuencia de las olas de calor también ha aumentado en Europa, Asia y Australia. En general, la mayoría de estudios pronostican que en el futuro habrá más eventos extremos de alta temperatura y menos de baja temperatura en la mayoría de las zonas terrestres. En esa línea, las olas de calor se producirán con mayor frecuencia y duración, mientras que los inviernos de frío extremo, aunque menos numerosos, podrán seguir teniendo lugar.

⁴ Un evento extremo meteorológico es un evento inusual para un lugar en particular y una época del año concreta. Puede considerarse evento extremo meteorológico cuando se encuentra por encima o por debajo del percentil 90 o 10 de la función de probabilidad observada. Por otra parte, para que se pueda hablar de evento extremo climático se precisa que el patrón meteorológico extremo se extienda en el tiempo hasta afectar de forma significativa a los parámetros climáticos medios de una estación.

La frecuencia y la intensidad de precipitaciones torrenciales han variado: en América del Norte y Europa se han incrementado, mientras que en otros continentes no hay tanta evidencia. Las proyecciones globales a corto y largo plazo confirman una tendencia clara de aumento en las precipitaciones medias a nivel mundial, pero hay variaciones significativas entre regiones. Por ejemplo, las precipitaciones extremas se harán más intensas y más frecuentes en la mayor parte de las latitudes medias y las regiones tropicales húmedas.

También ha habido una modificación en la actividad de huracanes o ciclones en el siglo XX. El informe AR4 del IPCC concluyó que existe una tendencia creciente de ciclones tropicales desde 1970 en algunas regiones. No obstante, la literatura más reciente indica que es difícil sacar conclusiones firmes con respecto a los niveles de confianza asociados con las tendencias observadas antes de la era de los satélites. Sin embargo, las proyecciones futuras de la actividad de los ciclones tropicales prevén que habrá una disminución o en todo caso un estancamiento a nivel agregado durante el siglo XXI. A nivel mundial, el área abarcada por sistemas monzónicos aumentará durante este siglo, mientras que los vientos del monzón se debilitarán y las precipitaciones se intensificarán debido al aumento de la humedad atmosférica.

Gráfico nº 8. **IMPACTOS DE EVENTOS EXTREMOS PROYECTADOS POR EL PROYECTO PESETA**



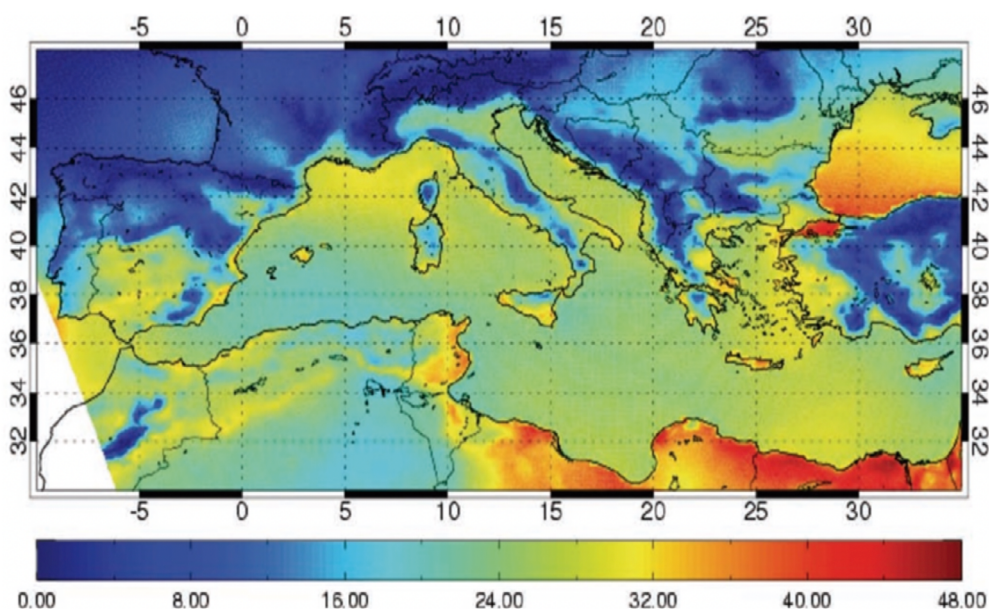
Nota: en la versión digital está disponible a color. www1.euskadi.net/ekonomiaz

Fuente: Proyecto Peseta (Projection of Economic impacts of climate change in Sectors of the European Union based on bottom-up Analysis) Joint Research Centre-Institute for Prospective Technological (European Commission).

A nivel europeo, los proyectos PESETA (Projection of Economic impacts of climate change in Sectors of the European Union based on bottom-up Analysis) desarrollaron unos modelos *bottom-up* de impactos climáticos esperados. El gráfico nº 8 recoge uno de estos impactos a modo de ejemplo: el número de noches tropicales consecutivas.

De nuevo, en España, es la AEMET quien ha realizado estudios que analizan la evolución de los eventos extremos. Para ello han desarrollado proyectos que estudian las tendencias de una serie de índices de extremos, tales como el aumento en el número de días y noches cálidas, la frecuencia de olas de calor, los días de precipitación o el número de días secos consecutivos. Los principales resultados en estos ámbitos provienen del proyecto ENSEMBLES. A modo de ejemplo se incluyen dos gráficos. El gráfico nº 9 presenta una proyección de las noches tropicales (aquellas en las que la temperatura no baja de los 20°C) y la Figura 10 muestra el aumento proyectado en la duración máxima de los periodos de sequía (con precipitaciones por debajo de 1mm).

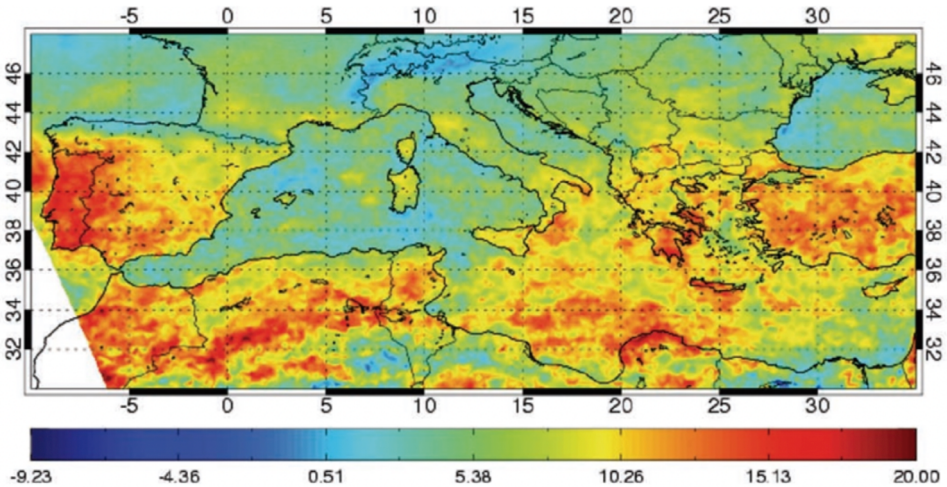
Gráfico nº 9. **AUMENTO PROYECTADO DEL NÚMERO DE NOCHES TROPICALES (>20°C) EN EL MEDITERRÁNEO, EN EL PERIODO 2021-2050 EN RELACIÓN A LA MEDIA DE 1961-1990. ESCENARIO A1B**



Nota: en la versión digital está disponible a color. www1.euskadi.net/ekonomiaz

Fuente: Proyecto Peseta (Projection of Economic impacts of climate change in Sectors of the European Union based on bottom-up Analysis) Joint Research Centre-Institute for Prospective Technological (European Commission).

Gráfico nº 10. **AUMENTO ESPERADO EN LA DURACIÓN MÁXIMA DE SEQUÍAS (<1MM) EN EL MEDITERRÁNEO, EN EL PERIODO 2021-2050 EN RELACIÓN A LA MEDIDA DE 1961-1990. ESCENARIO A1B**



Nota: en la versión digital está disponible a color. www1.euskadi.net/ekonomiaz

Fuente: Proyecto Peseta (Projection of Economic impacts of climate change in Sectors of the European Union based on bottom-up Analysis) Joint Research Centre-Institute for Prospective Technological (European Commission).

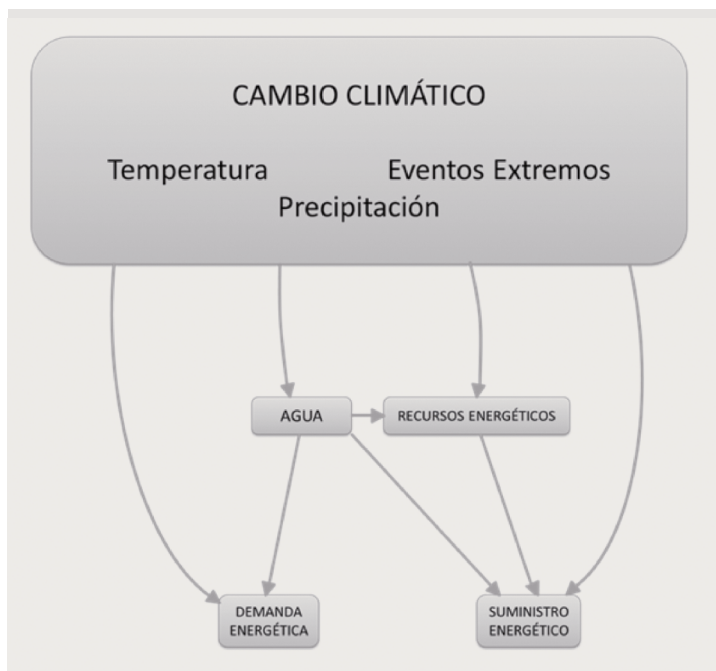
Las zonas más expuestas a estos eventos extremos son las zonas de costa. En España, el estudio de referencia sobre impactos de cambio climático en costa es el C3E, desarrollado por la Universidad de Cantabria para la OECC. Dentro de la zona costera, el proyecto se centra en los riesgos de inundación y erosión y la incidencia sobre las infraestructuras; más concretamente en los impactos y adaptación en grandes ciudades costeras y en el sector turístico.

3.2. Impactos en el sistema energético

Mientras que en la sección precedente se describieron cualitativamente los impactos del cambio climático sobre los sistemas físicos (temperatura, precipitaciones y eventos extremos), en este apartado se presenta una cuantificación de los impactos esperados del cambio climático sobre el sistema energético basándose en el AR5 del IPCC y en una revisión amplia de la literatura relacionada.

En este punto, el sistema energético se considera subdividido en tres ámbitos principales, como se puede observar en el gráfico nº 11: fuentes de energía (agua y otros recursos), demanda de energía y suministro de energía. Como se mencionó anteriormente, el agua se considera aparte de los recursos energéticos, ya que tiene una mayor importancia que otras fuentes de energía, y porque afecta fuertemente a muchas partes de la estructura.

Gráfico nº 11. **MARCO GENERAL. IMPACTO SOBRE LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS**



Fuente: Elaboración propia.

Los recursos energéticos se refieren a la cantidad de energía primaria disponible; la demanda de energía se refiere al uso final de la energía; y el suministro de energía se centra en las tecnologías que convierten la energía primaria en una forma que pueda ser utilizada por los consumidores.

Con respecto al suministro, dado que parte importante del sistema energético actual (e incluso las instalaciones de energía en construcción o en proyecto que se llevarán a cabo en los próximos años) probablemente seguirá estando operativa en las nuevas condiciones climáticas debido a la larga vida útil de la infraestructura energética, se hace especialmente necesario realizar un análisis preciso de la oferta actual.

En esta sección se tratará por tanto de cubrir una amplia variedad de impactos que el cambio climático puede tener sobre los sistemas de energía, y se hará siempre con la guía del marco conceptual del gráfico nº 11.

En el informe original (Girardi *et al.*, 2015) se analizan con todo detalle cada una de las interacciones entre cambio climático y oferta y demanda energéticas. En este trabajo presentamos tan solo los cuadros que resumen algunos de los hallazgos a nivel mundial presentes en la literatura. La concreción para el caso español se incluye en el siguiente apartado.

3.2.1. Impactos en la oferta

El cuadro nº 2 recoge los impactos de los cambios de temperatura en la generación de energía.

Cuadro nº 2. IMPACTOS DE LA TEMPERATURA SOBRE LA OFERTA

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
Eficiencia		
Fotovoltaica	El aumento de las temperaturas puede modificar la eficiencia de las células fotovoltaicas (la energía producida depende de la temperatura de la célula) y reducir la generación eléctrica PV.	Crook et al., 2011
Centrales térmicas	Para un aumento de temperatura de 1°C, hay una reducción en la generación en las centrales nucleares del 0,8%, y en centrales de gas y carbón de un 0,6%, debido a la pérdida de eficiencia térmica. Un aumento del 1°C en la temperatura ambiente reduce la generación en plantas térmicas aproximadamente un 0,45%.	Linnerud et al., 2009
Transmisión y distribución	Podría haber un aumento en las pérdidas en la transmisión debido a una mayor temperatura. Las altas temperaturas también pueden reducir la eficiencia de los transformadores.	Eskeland et al., 2008

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro nº 3 presenta los impactos de los cambios de la disponibilidad de agua en el suministro de energía.

Cuadro nº 3. IMPACTOS DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA SOBRE LA OFERTA

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
Refrigeración (plantas térmicas)	Necesidad de agua dulce para la generación termoeléctrica en 2035: + 20% extracción de agua dulce en comparación con 2010. + 85% consumo de agua dulce en comparación con 2010.	Durmayaz y Sogut, 2006; Tobin et al., 2018

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro nº 4 resume los impactos de los eventos extremos en el suministro de energía.

Cuadro nº 4. **IMPACTOS DE LOS EVENTOS EXTREMOS SOBRE LA OFERTA**

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
Reducción/ interrupción del suministro	El aumento esperado en los eventos extremos (como los huracanes) tendrá un impacto significativo en el sector energético. Los huracanes (vientos fuertes y olas altas) pueden tener un impacto debilitante en el suministro de energía. Los eventos extremos afectan a las centrales térmicas y nucleares, la infraestructura, plantas hidroeléctricas, parques eólicos, tuberías de petróleo y gas y la red eléctrica. Todos estos impactos pueden causar interrupciones de suministro.	Kopitko y Perkins, 2011

Fuente: Elaboración propia.

Por último, El cuadro nº 5 presenta los impactos de los cambios en los recursos energéticos sobre el suministro de energía.

Cuadro nº 5. **IMPACTOS DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS SOBRE LA OFERTA**

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
Hidroelectricidad	La producción de energía hidroeléctrica con base en el río Colorado podría disminuir hasta en un 40% a mediados de este siglo. La energía hidroeléctrica en Central Valley podría disminuir entre un 10% y un 12%. Europa del Norte: las afluencias a los ríos se incrementaría en un 11% entre 2001 y 2040. Esto aumentaría el suministro de energía en un 1,8% con respecto a 2001, o incluso hasta el 20% según otras estimaciones, con reducciones similares en Europa del Sur. Cambios en la generación de energía hidroeléctrica en 2050: 2931TWh generación +2.46TWh, cambio de +0,08% del total. A nivel global, reducciones entre el 61 y el 74% de la capacidad útil de las centrales hidráulicas.	Mideksa y Kallbekken, 2010; Tobin <i>et al.</i> , 2018; van Vliet <i>et al.</i> , 2016
Viento	-10 a -15% de la velocidad media del viento en los EE.UU. continental, que se correspondería con una reducción en la generación de energía eólica en el orden de 30 a 40%. En Europa la reducción de la generación eólica oscila entre el 5 y el 10%.	Breslow y Sailor, 2002; Tobin <i>et al.</i> , 2018
Fotovoltaica	-6% de producción eléctrica en las células solares debido a -2% de la radiación solar (Norte de Europa) Reducciones de hasta el 10%, y aumentos de hasta el 3% en distintos países europeos.	Fidje y Martinsen, 2006; Tobin <i>et al.</i> , 2018

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Impactos en la demanda

Esta sección se centra sobre todo en el impacto debido al aumento de temperatura. En el informe original se analizan con más detalle otras interacciones.

El cuadro nº 6 recoge los principales resultados encontrados.

Cuadro nº 6. IMPACTOS DE LA TEMPERATURA SOBRE LA DEMANDA

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
Demanda de calefacción	Incremento del 0.8% por año entre 2000 y 2030. Lento decrecimiento desde 2030. -34% en 2100 (Maryland, EE.UU.) Daños económicos asociados al cambio en la demanda de calefacción y climatización en Europa y EEUU, mayores en el segundo. Reducción en la demanda de calefacción de un 37% en Europa.	Ruth y Lin, 2006; Ciscar <i>et al.</i> , 2019; Ciscar <i>et al.</i> , 2018.
Demanda de refrigeración	7% incremento entre 2020 y 2030. +70% incremento para 2100 sobre la demanda estimada sin cambio climático; esto supone una demanda 40 veces superior en 2100 a la del 2000. Incremento del 50% de la demanda de refrigeración en Europa.	Wilbanks <i>et al.</i> , 2008; Ciscar <i>et al.</i> , 2018.
Industria	Consumo en EE.UU. por unidad de producción industrial: +0.0127% para un incremento de 1 HDD (Fahrenheit) +0.0032% para un incremento de 1 CDD (Fahrenheit) 1,098 billones m ³ de agua para 2100 (0,763 billones de m ³ en 2010: +45%)	MIT 2014
Agricultura	Carga riego en julio en Estados Unidos (Noroeste del Pacífico): + 9,8% sin cambios en la superficie de cultivo de regadío (evaluación anterior: + 8,7%) Agua en agricultura: 1,389 billones de m ³ en 2100 (1,551 billones de m ³ en 2010: -10%)	MIT 2014

Fuente: Elaboración propia.

4. CASO ESPAÑOL

En 2005, en el marco del proyecto ECCE (Efectos del Cambio Climático en España) promovido por la Oficina Española de Cambio Climático a través de un convenio de colaboración con la Universidad de Castilla La Mancha, un amplio panel de expertos nacionales en energía desarrollaron un informe sobre impactos en el sector debidos al cambio climático. Aunque propiamente no era un informe de adaptación, sus propuestas

pueden ser entendidas en esta clave. Se trata pues de un trabajo de referencia que en este último apartado se trata de complementar con los avances que hasta la fecha se han ido dando en materia de adaptación al cambio climático en el sector energético.

Como punto de partida, se incorpora un cuadro resumen, procedente de este informe de 2005, que muestra la escala de impactos que cada uno de los efectos asociados al cambio climático podría tener en las tecnologías y subsectores energéticos de nuestro país (Gráfico nº 12).

Gráfico nº 12. **IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SISTEMA ENERGÉTICO ESPAÑOL**

		Precipitaciones		Temperatura		Viento		Otros
		Incremento	Disminución	Incremento	Disminución	Incremento	Disminución	
Electricidad	Generación	Positivo (hidráulica)	Negativo	Negativo*	Positivo*	Positivo en cónica	Negativo en cónica	Solar: insolación positiva
	Transporte y Distribución	Negativo	Positivo	Negativo	Positivo	Negativo si es muy elevado	Neutro	
	Comercialización/demanda	Neutro	Neutro	Negativo **	Negativo **	Neutro	Neutro	Combinación Temperatura/Humedad y Temperatura/Viento: incremento conjunto provoca efecto negativo
Gas natural	Aprovisionamiento	Negativo	Positivo	Neutro	Neutro	Negativo (barco)	Neutro	
	Regasificación	Neutro	Neutro	Positivo	Negativo	Neutro	Neutro	
	Transporte y distribución	Negativo	Positivo	Positivo (gasoductos descubiertos)	Negativo (gasoductos descubiertos)	Neutro	Neutro	
	Almacenamiento	Neutro	Neutro	Negativo (almacenes descubiertos)	Neutro	Neutro	Neutro	
	Comercialización/Demanda	Neutro	Neutro	Negativo **	Negativo **	Neutro	Neutro	Combinación Temperatura/Humedad y Temperatura/Viento: incremento conjunto provoca efecto negativo
Petróleo	Refino	Neutro	Neutro	Negativo	Positivo	Neutro	Neutro	
	Transporte y distribución	Negativo	Positivo	Negativo	Negativo	Neutro	Neutro	
	Demanda	Neutro	Neutro	Negativo **	Negativo **	Neutro	Neutro	
Carbón	Extracción	Negativo	Positivo	Negativo	Positivo	Neutro	Neutro	
	Almacenamiento	Negativo	Positivo	Negativo	Positivo	Negativo	Neutro	
	Demanda	Negativo	Positivo	Negativo **	Negativo **	Neutro	Neutro	
Renovables uso no eléctrico	Producción	Positivo en biomasa	Negativo en biomasa	Negativo en biomasa	Negativo en biomasa	Neutro	Neutro	Solar de baja intensidad: insolación positiva

* Afecta al rendimiento de las centrales termoeléctricas, nucleares, cogeneración, biomasa, solar térmica, etc. Asimismo, la solar fotovoltaica disipa el calor con mayor dificultad.

** Se considera negativo al suponer una mayor demanda del recurso.

Fuente: Elaboración propia en base a información de ECCE.

4.1. Impactos en la oferta energética

Nos centraremos en este apartado en analizar tres ámbitos principales de impacto del cambio climático sobre la oferta energética en España, a saber, (1) los sistemas agua-energía, (2) la generación fotovoltaica y (3) la generación eólica.

4.1.1. Impactos vinculados a los usos del agua

El estudio de referencia en este ámbito es el desarrollado por Khan *et al.* (2016). Este estudio trabaja principalmente con dos escenarios de cambio climático a 2050:

- WC1na: escenario medio de cambio climático, sin adaptación.
- WC2na: escenario severo de cambio climático, sin adaptación.

Los principales resultados del estudio se exponen a continuación. En primer lugar, el cuadro nº 7 presenta los cambios en los usos del agua.

Cuadro nº 7. USOS Y CONSUMOS DE AGUA (en hm³)

	REF	WC-2012	WC1na	WC2na
Total de recurso natural disponible	110.116	110.116	99.934	70.985
Total de recurso natural disponible para energía	Ilimitada	19.699	17.247	12.651
Consumo de agua para Energía Primaria	1.413	1.383	1.413	1.413
Uso de agua para Energía Primaria	1.186	1.147	1.178	1.188
Consumo de agua para Conversión Energética	920	744	708	651
Uso de agua para Conversión Energética	39.379	38.569	37.123	33.788
Consumo de agua total para energía	2.332	2.284	2.279	2.199
Uso de agua total para energía	40.565	39.716	38.301	34.975

Fuente: Khan *et al.* (2016).

El cuadro nº 8 recoge las principales tendencias relacionadas con los impactos en los consumos energéticos debidos a los cambios en la disponibilidad y usos del agua.

Cuadro nº 8. DEMANDAS Y CONSUMOS ENERGÉTICOS (en EJ)

	REF	WC-2012	WC1na	WC2na
Electricidad generada	1,49	1,46	1,45	1,43
Electricidad renovable	0,77	0,74	0,73	0,71
Energía final total	5,63	5,64	5,64	5,62
Energía domestica	1,89	1,83	1,83	1,78
Dependencia energética (%)	74,84	75,43	75,39	75,89
Pérdidas en generación	1,71	1,65	1,65	1,63
Pérdidas en transporte	0,15	0,15	0,14	0,14

Fuente: Khan *et al.* (2016).

Se puede observar cómo en el escenario de cambio climático drástico sin adaptación se reduce el total de energía del sistema. Esto se debe a que el modelo utilizado prefiere ahorrar energía antes que aumentar los costes debidos a la falta de adaptación del sistema.

En este estudio no se han tenido en cuenta algunas interrelaciones del sistema, como son los posibles cambios en el coeficiente de aprovechamiento en función de los usos alternativos, por ejemplo, en los cambios en los caudales ecológicos. Tampoco se ha tenido en cuenta el posible cambio en el aterramiento de los embalses debido a un aumento de las precipitaciones extremas, lo que tendría a su vez un reflejo en la disponibilidad del recurso agua.

Es importante dejar claro que estos interesantes resultados provenientes de Khan *et al.* (2016) se centran solo en analizar los impactos del cambio climático en los sectores energéticos debidos a los cambios en la disponibilidad y los usos del agua. Para obtener una imagen completa del impacto total del cambio climático en el sistema energético español sería necesario emplear un modelo que recogiera todas las posibles influencias, no solo la debida al agua. Hasta la fecha, no somos conscientes de que ese trabajo se haya realizado.

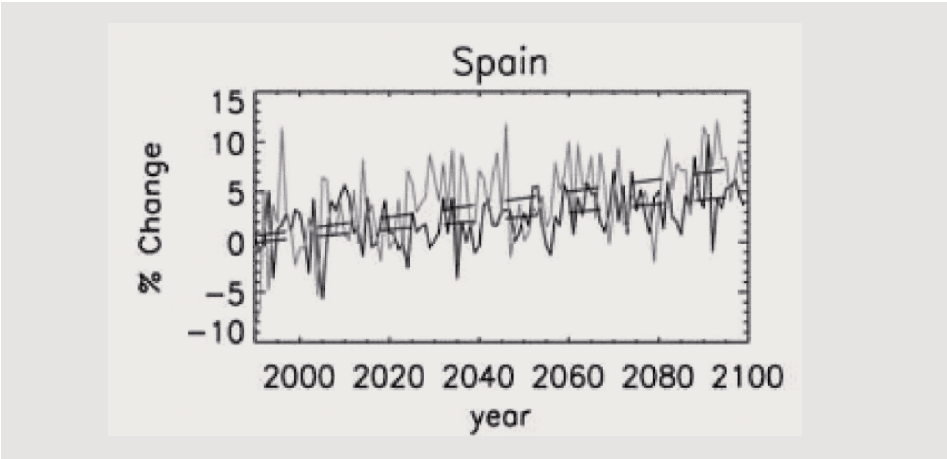
En otro estudio de interes Tobin *et al.* (2018) evalúan la producción hidroeléctrica en España para distintos escenarios de calentamiento global (hasta 3°C), encontrando reducciones de la producción de hasta un 18% a nivel agregado.

4.1.2. **Impactos en la producción fotovoltaica**

Uno de los estudios de referencia en este campo fue el desarrollado por Crook *et al.* (2011), basados en el escenario A1B del AR4. Se trata de un estudio internacional

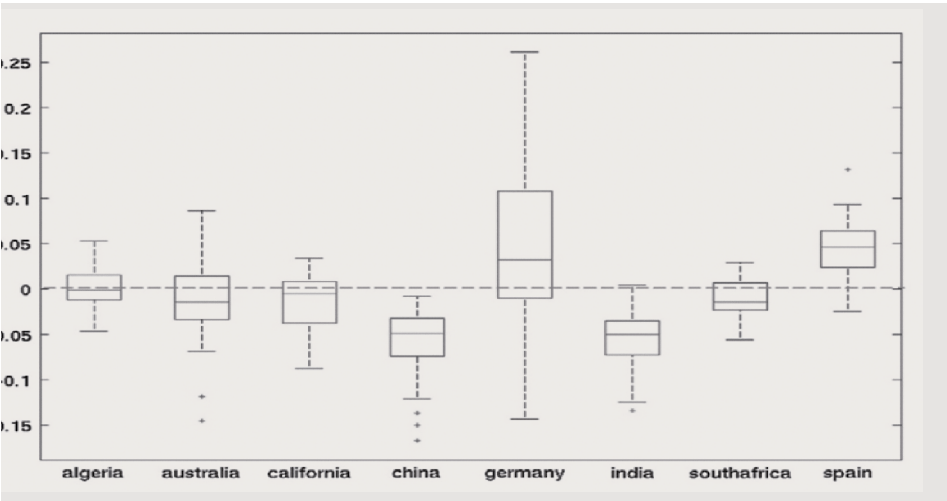
pero que tuvo una particularización para España. El gráfico nº 13 presenta la variación proyectada en la potencia fotovoltaica en España según dos modelos de trabajo (HadGEM1 y HadCM3).

Gráfico nº 13. CAMBIO EN LA GENERACIÓN FOTOVOLTAICA EN ESPAÑA (2000-2100). ESCENARIO A1B



Fuente: Crook et al. (2011).

Gráfico nº 14. CAMBIOS ESPERADOS EN EL POTENCIAL FOTOVOLTAICO EN EL PERIODO 2006-2049 EN RELACIÓN A LA MEDIA DEL PERIODO 2006-2015. RCP8.5



Fuente: Wild et al. (2015),

Si observamos las rectas de regresión que marcan las tendencias de ambos modelos de trabajo, el impacto es bajo, apenas supera el 5% en los albores de final de siglo. Estos resultados se explican por la evolución de dos factores: temperatura e irradiancia. Mientras que un aumento de la temperatura disminuye la eficiencia de los paneles, una mejora de la irradiancia (debido principalmente a la reducción media de la cubierta de nubes) la aumenta.

Estos datos se han visto complementados por el trabajo más reciente de Wild *et al.* (2015), basado en el escenario RCP8.5 cuyas estimaciones se presentan en el gráfico nº 14.

En el margen derecho de la imagen encontramos a España, que presenta un escueto potencial de incremento en la generación fotovoltaica centrado en el 5% para el periodo de estudio. Tobin *et al.* (2018) confirman el sentido positivo de los cambios, pero con magnitudes menores, limitadas al 2% de aumento.

4.1.3. *Impactos en el potencial eólico*

El trabajo más relevante en este aspecto es el de Santos *et al.* (2015), basado en el escenario A1B, para la Península Ibérica. El gráfico nº 15 muestra los resultados más destacados.

Gráfico nº 15. **CAMBIOS ESPERADOS EN EL POTENCIAL EÓLICO DE LA PENÍNSULA IBÉRICA (MWH/DÍA) EN EL PERIODO 2041-2070. ESCENARIO A1B**

	DJF	MAM	JJA	SON
1. Northern Galicia	-0.31 (-0.54)	-1.29 (-1.16)	0.41 (0.41)	-1.00 (-0.61)
2. Burgos	-0.02 (-0.97)	-1.19 (-1.32)	0.21 (0.19)	-0.55 (-0.63)
3. Ebro valley	-0.13 (-0.49)	0.79 (0.72)	1.47 (1.34)	0.56 (0.34)
4. Northern Portugal	-0.76 (-0.96)	-0.81 (-1.28)	-0.61 (-0.32)	-0.88 (-0.82)
5. Southern Cataluña	-1.46 (-1.42)	0.76 (0.06)	-0.11 (-0.34)	-0.94 (-1.31)
6. Oeste	-0.51 (-1.02)	-0.90 (-0.60)	0.26 (0.00)	-0.66 (-0.58)
7. Albacete	-0.56 (-1.16)	-1.02 (-0.83)	0.47 (0.63)	-0.51 (-0.61)
8. Southern Andalucía	3.05 (2.14)	1.38 (1.07)	1.78 (1.14)	3.60 (3.06)

Fuente: Santos *et al.* (2015).

Las proyecciones del cambio climático presentan una disminución significativa en la mayor parte de la Península Ibérica (<2 MWh / día); aunque lo más destacable quizás sea el fuerte aumento de los potenciales en otoño en el sur de Andalucía (> 2 MWh / día). Esto se traduciría en una reducción media del potencial eólico en la Península en el periodo considerado del 15%, llegando incluso a un 40% en invierno.

Tobin *et al.* (2018) muestran resultados más conservadores: reducciones de entre el 2 y el 3% en la producción de electricidad con energía eólica para escenarios de calentamiento de hasta 3°C.

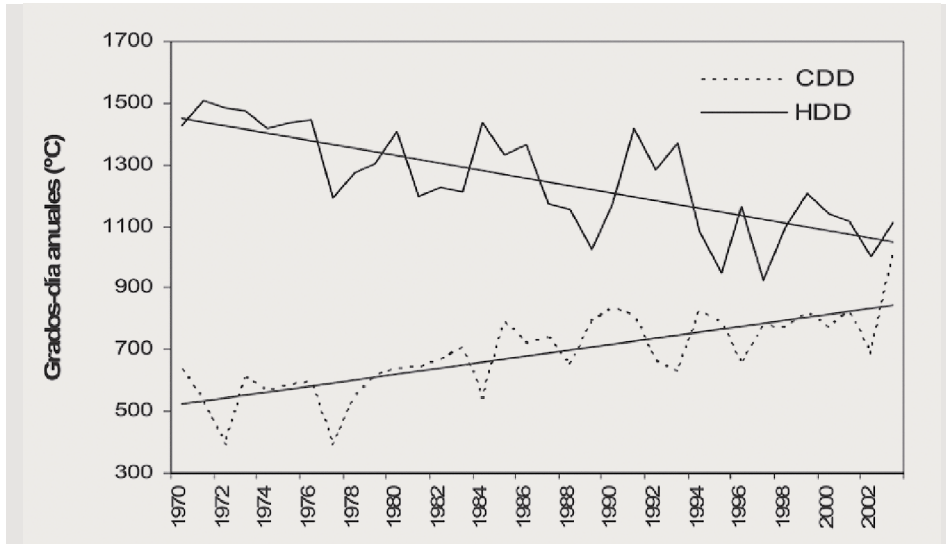
Es importante incidir en este punto sobre la necesidad de tomar estos resultados con prudencia, pues pueden cambiar mucho si el análisis se realiza teniendo en cuenta las distribuciones de viento en lugar de las velocidades medias. Este ejercicio es uno de los temas pendientes a abordar en el futuro.

4.2. Impactos en la demanda de energía

Nos centramos en el efecto principal del cambio climático sobre la demanda energética, a saber, los cambios en las necesidades de calefacción y refrigeración debidos al esperado aumento de temperatura.

Ya el informe «Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático» elaborado para el Ministerio de Medio Ambiente en 2005, con el que abrimos esta sección, se atendía a este tema. Suya es la autoría del gráfico nº 16.

Gráfico nº 16. **EVOLUCIÓN DE LOS HDD Y CDD EN ESPAÑA EN EL PERIODO 1970-2002**



Fuente: Ministerio de Medio Ambiente.

El gráfico presenta una clara tendencia decreciente de los grados día de calefacción anuales (HDD) y asimismo una clara tendencia creciente de los grados día de refrigeración (CDD), ambas son consecuencia de una elevación progresiva de la temperatura media en las tres décadas del estudio.

Estos datos se vieron confirmados por Ortiz Beviá *et al.* (2012). En este trabajo se investigó la evolución de las necesidades de calefacción y refrigeración (HDD y CDD) en el caso de España en el periodo 1958-2005, y se plantearon proyecciones al medio plazo. La variabilidad observada se obtuvo de los registros de temperatura en 31 estaciones de toda España y de los datos de los censos disponibles. Respecto a la evolución futura de los grados-día, estos se estimaron con cuatro simulaciones realizadas sobre el escenario A1B del AR4, para el período 2001-2050. Las tendencias encontradas para las necesidades de calefacción (grados-día) en invierno no fueron muy significativas. Sin embargo, las tendencias observadas para las necesidades de refrigeración en verano sí lo fueron.

Gráfico nº 17. **AUMENTO DE LOS GRADOS DÍA DE REFRIGERACIÓN (CDD/DÉCADA) EN ESPAÑA SEGÚN DIFERENTES MODELOS. ESCENARIO A1B**

Model	(1950-1989)	(2010-2049)
INGV	$(5.49\% \pm 3.2\%)$	$(10.61\% \pm 4.9\%)$
IPSL	$(1.07\% \pm 8.1\%)$	$(27.68\% \pm 6.4\%)$
MPIM	$(7.25\% \pm 7.2\%)$	$(12.07\% \pm 4.0\%)$
MeteoFrance	$(9.42\% \pm 7.2\%)$	$(16.47\% \pm 6.7\%)$
Observed	$(4.92\% \pm 2.9\%)$	

Fuente: Ortiz Beviá *et al.* (2012).

En el gráfico nº 17 se presentan los resultados del estudio en lo que a aumento de CDD en España se refiere. Las proyecciones medias de aumento de los CDD/década se sitúan en 14% +/- 5,3%, un aumento muy considerable.

Ahora bien, es preciso señalar que estas estimaciones de necesidades de calefacción y refrigeración no están ponderadas por la población, y por tanto no pueden extrapolarse directamente en términos de consumo energético. De nuevo, es otro análisis de detalle aún pendiente.

5. PROPUESTAS DE ADAPTACIÓN

Tal y como señala el Banco Mundial (Erdinger, 2011), hasta la fecha, los responsables público-privados del sector energético se han centrado en la maximización de los suministros de energía para satisfacer la demanda, mientras que la gestión de los riesgos ha quedado en un segundo plano. Toda la evidencia disponible sugiere que la gestión de los riesgos planteados por el clima actual y futuro no es algo opcional sino algo absolutamente necesario, y además es probable que se convierta cada vez en más importante a medida que las consecuencias del cambio climático se materialicen.

5.1. Medidas propuestas a nivel internacional

La adaptación en su totalidad es un área extensa que abarca muchos sectores y estructuras socio-económicas, tal y como ha declarado la Convención sobre el Cambio Climático. Aunque la adaptación a estos impactos requerirá grandes inversiones y decisiones estratégicas, algunas acciones que podrían empezar a implementarse serían las siguientes:

- *Aumentar la concienciación y el intercambio de conocimientos.* Hay una necesidad de difundir y aumentar el conocimiento de los efectos del clima en el sector de la energía. Para poder tomar decisiones correctas es imprescindible: (a) mejorar el conocimiento de estos temas por parte de la ciudadanía, y (b) proveer de acceso abierto a los datos climáticos para facilitar la investigación.
- *Llevar a cabo una evaluación concreta de las necesidades vinculadas a los impactos del cambio climático en el sector.* Este análisis del impacto climático es el primer paso hacia el desarrollo de estrategias de adaptación. Es necesario también incluir una evaluación de los costes asociados a los impactos, y de las consecuencias que se generarían si no se aplicara una correcta gestión del riesgo climático.
- *Desarrollar herramientas de evaluación.* Desarrollo de plantillas para proyectos que incorporen la vulnerabilidad y los riesgos del clima, ya sea retrospectivamente o durante la planificación y ejecución de los proyectos. Esto debería exigirse particularmente a los proyectos de gran envergadura. Es necesario desarrollar un catálogo de reglas sencillas de decisión para la integración del riesgo climático en la toma de decisiones (por ejemplo, cómo elegir ubicaciones para nuevas plantas de energía, teniendo en cuenta el clima). Los modelos de simulación podrían apoyar al desarrollo de estas medidas mediante análisis de sensibilidad ante distintos parámetros.
- *Desarrollar normas de adaptación para el sector de la energía.* Estas normas deberían cubrir aspectos de ingeniería y requisitos de información. Podría ser acometido a través del sector de la energía en sí, o a través de organizaciones internacionales como la Agencia Internacional de Energía (AIE), la Asociación Internacional de Energías Renovables (IRENA), y las universidades o instituciones de investigación.
- *Revisar los plazos de planificación y el uso de datos históricos y proyecciones para futuras inversiones.* Los enfoques de planificación tradicionales que utilizan datos históricos pueden necesitar ser revisados y ajustados para reflejar las tendencias climáticas previstas como base para futuras inversiones en energía.
- *Establecer planes de adaptación para las infraestructuras existentes.* Algunas metodologías disponibles, como las auditorías ambientales, pueden ayudar a identificar los cambios necesarios en los protocolos de operación y mantenimiento, o incluso los estructurales que exijan hasta la reubicación de plantas existentes.

- *Implementar medidas de adaptación específicas por tecnologías.* En el informe completo se detallan una serie de propuestas particulares. A modo de resumen se presentan algunas:
 - Explorar la interacción entre la demanda de agua y su uso.
 - Comprender mejor los impactos del cambio climático sobre el potencial de recursos renovables.
 - Explorar las sinergias entre mitigación del cambio climático y la adaptación.
 - Identificar las opciones (tecnológicas y de comportamiento) para mejorar el ahorro y la eficiencia en generación y reducir la demanda pico eléctrica.
- *Identificar los instrumentos de política necesarios para hacer frente a los impactos del cambio climático.* Por ejemplo, instrumentos de política que apoyan la internalización de la adaptación en operaciones de energía; o los incentivos para permitir la planificación con plazos más largos.
- *Fortalecer las estructuras de soporte.* Aumentar la capacitación de los actores claves, incluyendo los responsables del sector de políticas energéticas, los reguladores y los operadores.

Algunas de estas medidas, como la identificación y evaluación de medidas de adaptación específicas, o los instrumentos de política necesarios, ya están siendo emprendidas por la comunidad científica.

5.2. Medidas propuestas en España

En las consultas con expertos realizadas, uno de los puntos en el que se ha visto necesario profundizar ha sido el relacionado con la investigación. Se considera de vital importancia profundizar en el conocimiento de las dinámicas de cambio climático que permitan mejorar la planificación por parte de los agentes del sistema energético. Algunos de los puntos que se perciben como claves en las que profundizar se han organizado siguiendo la propuesta de marco de opciones de adaptación propuesta por el IPCC en el AR5.

Estos puntos se recogen también en el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2021-2030, que identifica algunos de ellos de manera específica para el sector energético:

- Mejorar el conocimiento sobre los impactos del cambio climático en los potenciales de producción de las energías renovables y trasladar los resultados a la planificación energética.
- Mejorar el conocimiento sobre los impactos potenciales del cambio climático en la funcionalidad y resiliencia de los sistemas de generación, transporte, almacenamiento y distribución de la energía y concretar medidas de adaptación para evitar o reducir los riesgos identificados.

- Mejorar el conocimiento sobre los impactos del cambio climático en la demanda de energía e identificar medidas para evitar o limitar los picos de demanda, especialmente los asociados al calor.
- Identificar riesgos derivados de eventos extremos en las infraestructuras energéticas críticas y aplicar medidas para evitar su pérdida de funcionalidad.

Las propuestas también se han incorporado al Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030, que además enfatiza la sinergia entre la adaptación y las acciones de mitigación necesarias para cumplir con los objetivos planteados de emisiones de gases de efecto invernadero: el despliegue de las energías renovables, del almacenamiento y de la eficiencia energética reducirá la necesidad de consumo de agua de refrigeración de las centrales térmicas, permitirá gestionar la producción ante la previsible disminución de los recursos hídricos regulables, y limitará el crecimiento de la demanda de energía para climatización.

Cuadro nº 9. **PROPUESTAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SECTOR ENERGÉTICO ESPAÑOL**

Categorías de adaptación		Medidas para el sector energético español
Estructurales	Información	Afinar las estadísticas de viento proporcionando los cambios esperados, no solo en las velocidades medias a una determinada elevación sino también en las distribuciones, para de esta manera poder estimar mejor lo cambios en los potenciales eólicos. Sería ideal particularizarlo, en la medida de lo posible, también por cuencas. De la misma manera que con el viento, sería muy provechoso estudiar los otros parámetros climáticos básicos: temperatura y régimen de lluvias, no solo en términos agregados sino en términos de distribución temporal y regional. Esto permitiría a su vez afinar en el estudio del impacto directo sobre la oferta y demanda energética. Tanto en este punto como el anterior, existen algunos trabajos ya realizados por parte de diferentes empresas energéticas (Endesa, Iberdrola, Gas Natural, Repsol, entre otras), que pueden servir de base para futuros trabajos. Elaborar un histórico detallado de fenómenos extremos que permita proyectar, con una correcta base estadística, implicaciones a futuro. Sería positivo disponer de una base de datos, con criterios comunes, que incluya un histórico lo más amplio posible. Del análisis de esta información deberían alimentarse tanto en la Planificación Energética como las Especificaciones o Normas Técnicas constructivas del sector.
	Tecnología	Desarrollar un análisis basado en modelos computacionales del impacto del cambio sobre el sistema energético nacional en su conjunto. En la actualidad existen algunos resultados para el nexo agua-energía que podrían servir de base para un estudio que integrara el resto de subsectores energéticos. Hacer estimaciones por escenarios (tendenciales y disruptivos) para la demanda de calefacción y de refrigeración, mediante estudios de sensibilidad. Realizar un análisis de los HDD y los CDD ponderados por población, incorporando además factores como la humedad que influyen de una manera muy relevante en la sensación térmica. Recoger también en estos análisis el impacto en la demanda de calefacción y refrigeración en la industria y en el tercer sector.

.../...

.../...

Categorías de adaptación		Medidas para el sector energético español
Estructurales	Basadas en ecosistemas	Prestar una especial atención a los impactos derivados de la subida del nivel del mar sobre todas las infraestructuras energéticas operativas en la costa española. Del mismo modo, incorporar estas consideraciones en el estudio de viabilidad de nuevas infraestructuras a construir en dichas zonas. En este punto, serán de mucha ayuda los resultados del proyecto C3E que elaboró la Universidad de Cantabria para la OECC en 2012.
	Nexos	Profundizar en el análisis de las interrelaciones entre los sistemas energético y agropecuario, con especial atención a los biocombustibles y sus necesidades de agua.
Estructurales - físicas	Información	Diseñar una política de comunicación y difusión de estos resultados que consiga trasladar eficazmente al conjunto de la sociedad la importancia y urgencia de abordar esta problemática de manera integrada.
	Comportamiento	Fomentar una cultura empresarial nueva que prime el largo plazo frente al corto plazo en su planificación estratégica.
	Economía	Sería conveniente realizar estudios económicos más precisos en relación a las necesidades de financiación futuras vinculadas a las políticas de adaptación, tanto desde el sector público como privado. La pregunta a responder en este punto sería cuáles son los costes reales de la adaptación.
Sociales	Leyes y regulaciones	Facilitar una planificación estratégica conjunta, tanto a nivel público como privado, de los ámbitos energético y climático. Incorporar los riesgos regulatorios y de precios de CO ₂ en la planificación de la adaptación de cambio climático en el sector.
	Políticas y programas gubernamentales	Estudiar en profundidad las sinergias entre mitigación y adaptación. Para ello se propuso plantear el trabajo basado en escenarios base (2012) y futuros (2050 y 2100). Se consideró importante valorar en términos económicos el ahorro que en las políticas de adaptación pueden tener determinadas políticas de mitigación. Continuar con el trabajo de integración de las conclusiones obtenidas en los diferentes estudios de Adaptación en Cambio Climático que identifiquen las sinergias existentes entre ellos. Este punto fue identificado como uno de los más importantes por parte de los expertos consultados. Quedó patente la conveniencia de plantear un trabajo intersectorial sobre adaptación al cambio climático que integre los resultados parciales que ya se han obtenido y que ayude con ello a adecuar la Planificación Energética pública y privada a los requerimientos detectados. Un primer paso podría ser la elaboración de una encuesta por parte de la OECC en la que se interrogara al sector privado acerca de qué información o estudios técnicos necesitan para establecer sus propios análisis internos, de forma que puedan ser elaborados por las diferentes agencias estatales dedicadas a esa cuestión.

Fuente: Elaboración propia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEMET (2019): «Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España». <http://escenarios.adaptecca.es>
- BRESLOW, P.B.; SAILOR, D.J. (2002): «Vulnerability of wind power resources to climate change in the continental United States», *Renewable Energy* 27: 585-598.
- CEDEX (2010): «Evaluación del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural». Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al CEDEX para el estudio del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua. Clave CEDEX 42-407-1-001.
- (2012): «Efecto del cambio climático en los recursos hídricos disponibles en los sistemas de explotación». Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al CEDEX para el estudio del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua. Clave CEDEX 43-308-5-001.
- CÍSCAR, J.C.; FEYEN, L.; IBARRETA, D.; SORIA, A. (2018): «Climate impacts in Europe: Final report of the JRC Peseta III Project», European Commission EUR 29427 EN.
- CÍSCAR, J.C.; RISING, J.; KOPP, R.E.; FEYEN, L. (2019): «Assessing future climate change impacts in the EU and the USA: insights and lessons from two continental-scale projects», *Environmental Research Letters* 14: 084010.
- CROOK, J.A.; JONES, L.A.; FORSTER, P.M.; CROOK, R. (2011): «Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output», *Energy & Environmental Science*, 4(9): 3101-3109.
- DURMAYAZ, A.; SOGUT, O.S. (2006): «Influence of cooling water temperature on the efficiency of a pressurized water reactor nuclear power plant», *International Journal of Energy Research*, 30(10): 799-810.
- EBINGER, J.O. (2011): «Climate impacts on energy systems: key issues for energy sector adaptation, a World Bank study», World Bank, Washington, D.C.
- EEA (2019): «Adaptation challenges and opportunities for the European energy system. Building a climate-resilient low-carbon energy system», EEA Report 01/2019. European Environment Agency.
- FIDJE, A.; MARTINSEN, T. (2006): «Effects of the climate change on the utilization of solar cells in the Nordic region», Reykjavik, Iceland.
- GIRARDI, G.; ROMERO, J.C.; LINARES, P. (2015): *Informe de adaptación al cambio climático del sector energético español. Análisis de la influencia del cambio climático en la oferta y la demanda de energía*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- IPCC (2014): *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects* Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático
- KHAN, Z.; LINARES, P.; GARCÍA-GONZÁLEZ, J. (2016): «Adaptation to climate-induced regional water constraints in the Spanish energy sector: An integrated assessment», *Energy Policy*, 97: 123-135.
- LINNERUD, K.; MIDEKSA, T.K.; ESKELAND, G.S. (2011): «The impact of climate change on nuclear power supply», *Energy Journal*, 32: 149-168.
- MIDEKSA, T.K.; KALLBEKKEN, S. (2010): «The impact of climate change on the electricity market: A review», *Energy Policy*, 38: 3579-3585.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (2005): *Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático. Proyecto ECCE. Informe Final*. https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/plan-nacional-adaptacion-cambio-climatico/evaluacion-preliminar-de-los-impactos-en-espana-del-cambio-climatico/eval_impactos.aspx
- MIT (2014). «2014 Energy and climate outlook», MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change.

- OECC (2012): *Evidencias del cambio climático y sus efectos en España*. Oficina Española de Cambio Climático <https://www.adaptecca.es/documento/evidencias-del-cambio-climatico-y-sus-efectos-en-espana>.
- ORTIZ BEVIÁ, M.J.; SÁNCHEZ-LÓPEZ, G.; ALVAREZ-GARCÍA, F.J.; RUIZ DE ELVIRA, A. (2012): «Evolution of heating and cooling degree-days in Spain: Trends and interannual variability», *Global and Planetary Change*, 92: 236-247.
- RUTH, M.; LIN, A.-C. (2006): «Regional energy demand and adaptations to climate change: Methodology and application to the state of Maryland, USA», *Energy Policy*, 34: 2820-2833.
- SANTOS, J.A.; ROCHINHA, C.; LIBERATO, M.L.R.; REYERS, M.; PINTO, J.G. (2015): «Projected changes in wind energy potentials over Iberia», *Renewable Energy*, 75: 68-80.
- TOBIN, I.; GREUELL, W.; JEREZ, S.; LUDWIG, F.; VAUTARD, R.; VAN VLIET, M.T.H.; BRÉON, F.M. (2018): «Vulnerabilities and resilience of European power generation to 1.5°C, 2°C and 3°C warming», *Environmental Research Letters* 13: 044024.
- VAN VLIET, M.T.H.; WIBERG, D.; LEDUC, S.; RIAHI, K. (2016): «Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources», *Nature Climate Change* 6: 375-380.
- WILBANKS, T.J.; BHATT, V.; BILELLO, D.E.; BULL, S.R.; EKMANN, J.; HORAK, W.C.; HUANG, Y.J.; LEVINE, M.D.; SALE, M.J.; SCHMALZER, D.K.; SCOTT, M.J. (2008): *Effects of Climate Change on Energy Production and Use in the United States*, US Department of Energy

¿Qué beneficio económico se consigue con la reducción de la contaminación del aire mediante el arbolado de Euskadi?

What economic benefit is achieved by reducing air pollution through trees in the Basque Country?

Este trabajo determina la reducción de contaminantes del aire mediante los árboles en el País Vasco utilizando un modelo que simula el proceso de la deposición seca a nivel horario de material particulado (PM), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃) y dióxido de azufre (SO₂) y estima su beneficio económico en función del número de personas expuestas a distintos niveles de contaminación. Los resultados muestran que no solo los árboles dentro de las ciudades son los que contribuyen a la reducción de la contaminación, sino, sobre todo, los bosques de alrededor de grandes núcleos urbanos. El valor económico de los árboles por reducir estos contaminantes en términos de beneficios para la salud humana se estimó en 102 millones de euros al año.

Lan honetan, Euskal Autonomia Erkidegoan zuhaitzen bidez airearen kutsatzaileak murriztu daitezkeela azaltzen da. Horretarako, material partikulatua (PM), nitrogeno dioxidoa (NO₂), ozonoa (O₃) eta sufre dioxidoa (SO₂) ordu jakin batzuetan lehor uzteko prozesua simulatzen duen eredu ematen du. Eredu horren onura ekonomikoa kutsadura-maila desberdinen eraginean dauden pertsonen kopuruaren arabera dela zehazten du. Emaitez erakusten dutenez, hiri barruko zuhaitzek ez ezik, hirigune handien inguruko basoek ere laguntzen dute kutsadura murrizten. Kutsatzaile horiek murrizteko eta, ondorioz, gizakien osasuna hobetzeko zuhaitzek duten balio ekonomikoa urtean 102 milioi eurokoa dela kalkulatu zen.

This study estimates air pollution removal by trees in the Basque Country and calculates their economic value. The study has developed a model that simulates the process of dry deposition on trees on an hourly basis of particulate matter (PM), nitrogen dioxide (NO₂), ozone (O₃) and sulphur dioxide (SO₂) and estimates its economic benefit based on the number of people exposed to different levels of pollution. The results show that it is not only the trees within cities that contribute to the removal of air pollutants, but especially the forests around large urban centres. The economic value of plant removal in terms of benefits for human health was estimated at 102 million euros per year.

Índice

1. Introducción
2. Descripción del contexto en el País Vasco
3. Datos utilizados
4. Metodología
5. El valor económico de los árboles por reducir la contaminación atmosférica
6. Implicaciones y conclusiones

Referencias bibliográficas

Palabras clave: árbol, bosque, deposición seca, velocidad de deposición, servicios ecosistémicos, País Vasco.

Keywords: tree, forest, dry deposition, plating speed, ecosystem services, Basque Country.

Nº de clasificación JEL: C13, Q23, Q53

Fecha de entrada: 06/03/2020

Fecha de aceptación: 17/04/2020

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica es el mayor contribuyente a la carga global de enfermedades como consecuencia a la exposición a peligros ambientales. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), alrededor de 7 millones de personas mueren cada año como resultado de la exposición a la contaminación del aire (OMS, 2014). Entre los impactos de la contaminación del aire, cabe destacar la disminución de la duración de la vida humana, el aumento de los costes médicos y la reducción de la productividad mediante los días de trabajo perdidos en la economía. El informe elaborado en 2017 por la Agencia Europea de Medio Ambiente considera que, en Europa, los contaminantes atmosféricos más importantes en términos de daño a la salud humana son el material particulado (PM), el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el ozono (O₃) (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2017a). Según este informe, las estimaciones de impactos de la salud atribuibles a la exposición a la contaminación aérea indican que concentraciones de PM en 2014 fueron responsables de alrededor de 399.000 muertes prematuras en la Unión Europea (UE-28), otras 75.000 muertes adicionales debido al NO₂ y 13.600 debido al O₃. Por lo tanto, reducciones sostenidas en la exposición a la contaminación del aire se correlacionan significativamente con las mejoras en la esperanza de vida y el bienestar social.

La calidad del aire es un problema ambiental y social de gran complejidad que plantea múltiples desafíos en términos de gestión y mitigación de contaminantes dañinos (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2017a). Los contaminantes atmosféricos pueden ser emitidos por la acción humana o de manera natural y pueden ser emitidos directamente (contaminantes primarios) o formados en la atmósfera (contaminantes secundarios). En general, los contaminantes en la atmósfera tienen una serie de impactos en la salud humana, ecosistemas y el clima; y dado que, mediante el transporte, la dispersión y la sedimentación pueden ser desplazados a largas distancias, llegan a afectar grandes extensiones geográficas.

Numerosos programas e instituciones han sugerido múltiples medidas y planes de gestión para mejorar la calidad del aire (Escobedo *et al.*, 2011). Si bien gran parte de la discusión se ha centrado en medidas que reducen las emisiones, como la disminución del uso de coches, la eliminación gradual de tecnologías antiguas y el uso del transporte público, existe un gran potencial para reducir la contaminación del aire mediante el uso y la gestión de la vegetación. La eliminación de la contaminación del aire por la vegetación puede ser una opción complementaria y efectiva a las medidas impugnadas, como la exclusión de vehículos o la limpieza húmeda de las calles, dados los beneficios colaterales y otros servicios ecosistémicos que puede ofrecer la vegetación (Vailshery *et al.*, 2013). En la UE, varias directivas y decisiones han señalado la necesidad de reducir la contaminación a niveles que minimicen los efectos nocivos para la salud humana, mejorar el monitoreo y la evaluación de la calidad del aire y proporcionar información accesible al público en general (por ejemplo, UE 2002; 2008). De esta manera, la infraestructura verde y las soluciones basadas en la naturaleza en entornos densamente poblados han sido destacadas en la UE para regular los contaminantes y el CO₂ en la atmósfera.

Dada su gran resistencia superficial, las plantas tienen el potencial de reducir significativamente la contaminación del aire a través de la deposición seca. La deposición seca es la transferencia de contaminantes gaseosos o material particulado hacia la superficie de la tierra, incluyendo suelo, agua y vegetación. Las partículas atmosféricas pueden depositarse cuando pasan cerca de una superficie. En comparación con las superficies fabricadas, los árboles tienen una gran superficie por unidad de volumen, lo que aumenta la probabilidad de deposición (Janhall, 2015). La vegetación afecta directamente a la calidad del aire mediante la reducción de la concentración de partículas atmosféricas, por medio la emisión de partículas como el polen y los compuestos orgánicos volátiles (también considerados contaminantes del aire), y mediante la resuspensión de partículas capturadas en la superficie de la planta. La vegetación también afecta a la calidad del aire al alterar la temperatura y los flujos de energía, por ejemplo, al reducir la exposición a la radiación solar, la velocidad del viento y al amortiguar temperaturas extremas del aire. Además, las partículas atmosféricas que son interceptadas por la planta pueden ser absorbidas por los tejidos vegetales o retenidas en la superficie de las hojas, yemas, ramas y troncos de los árboles. Algunos contaminantes absorbidos en la planta pueden llegar

a ser utilizados por los tejidos vegetales o pueden ser desechados. Por ejemplo, Lockwood *et al.* (2008) demostraron que los nitratos orgánicos atmosféricos eran absorbidos por las hojas y convertidos en aminoácidos foliares. Las partículas retenidas en la superficie de la planta a menudo caen al suelo con la caída de hojas y ramillas, son arrastradas por la lluvia o resuspendidas en la atmósfera.

La reducción de la contaminación del aire por la vegetación generalmente se mide mediante experimentos de laboratorio, mediciones de campo y mediante el uso de modelos. A una escala espacial más grande, la eliminación de la contaminación del aire por la vegetación se puede medir mediante el uso de la técnica *eddy covariance*, la cual calcula los flujos de carbono, agua, calor y gases traza entre las superficies terrestres y la atmósfera (Liang *et al.*, 2012). A escala regional, normalmente se usan modelos matemáticos para predecir la deposición seca. En la literatura, existen modelos de eliminación de contaminación del aire por la vegetación como UFORE-D, i-Tree, EMEP y TreeDep. Estos modelos utilizan información de la planta obtenida de trabajos de campo, datos meteorológicos y de concentración de contaminantes recogidos en estaciones de calidad del aire.

Algunos estudios han relacionado el efecto de la reducción de la contaminación del aire producido en la vegetación, en la salud y el bienestar de las personas mediante la aplicación de herramientas de Evaluación de Impacto en la Salud (HIA, por sus siglas en inglés) (Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos, 2012; Davidson *et al.*, 2007). En esta línea, varios trabajos han desarrollado ecuaciones matemáticas con el fin de estimar el efecto de la reducción de la concentración de contaminantes sobre el número de defunciones, ingresos hospitalarios y medidas genéricas de la carga de enfermedades y calcular su valor económico (Nowak *et al.*, 2013; 2018). Estas ecuaciones se basan en una gran cantidad de trabajos epidemiológicos que miden el efecto de la contaminación del aire en la salud de las personas. En España, varios trabajos han estimado los riesgos relativos atribuibles a la mortalidad diaria asociada respectivamente a concentraciones de PM_{10} , NO_2 y O_3 y han calculado el número de muertes por causas naturales, circulatorias y respiratorias en cada una de las provincias de España (Ortiz *et al.*, 2017; Linares *et al.*, 2018; Díaz *et al.*, 2018a; 2018b). A pesar de que estos trabajos no consideran el efecto de la vegetación, los coeficientes estimados en las ecuaciones de regresión también pueden usarse para calcular dicho efecto sobre la salud de las personas.

La mejora de la calidad del aire por la vegetación representa una externalidad positiva, la cual puede internalizarse mediante la estimación del valor económico del beneficio para la sociedad. Por este motivo, el análisis coste-beneficio se ha convertido en una herramienta importante en el análisis de numerosas políticas de contaminación del aire (Davidson *et al.*, 2007). Un enfoque comúnmente utilizado para evaluar los efectos de la contaminación del aire es el enfoque del coste del daño o método de dosis-respuesta, que se centra en la cuantificación del impacto explícito en la salud humana, el medio ambiente y la actividad económica. La conversión de

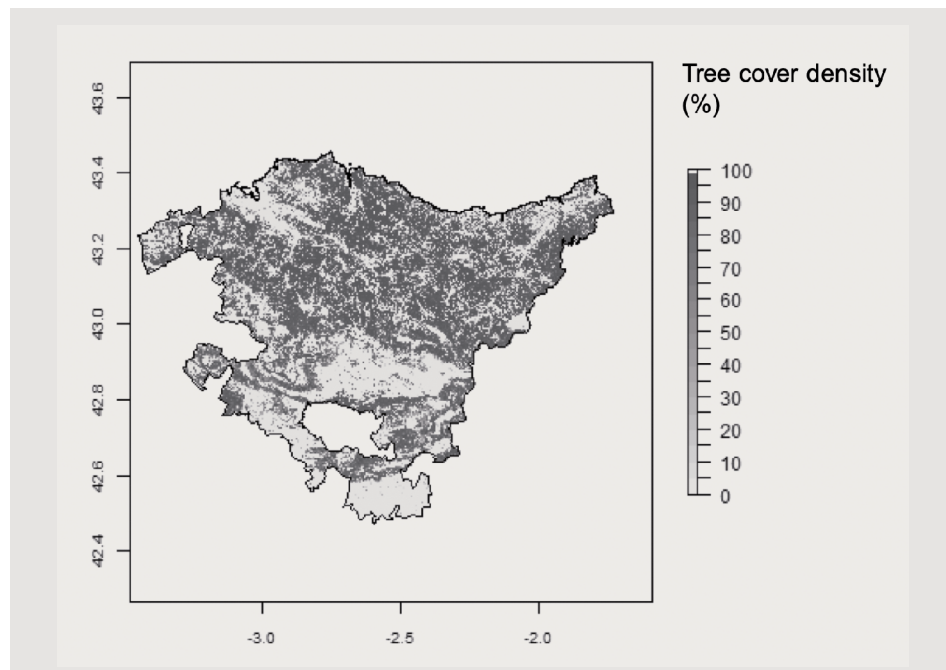
los impactos de la contaminación del aire en la salud en términos monetarios se suele basar en estudios de valoración de preferencia declarada sobre valoración de la mortalidad y morbilidad, como la disposición a pagar, estimada mediante métodos de valoración contingente o experimentos de elección, y en tendencias económicas generales que influyen en la valoración de daños (Ricardo-AEA, 2014). En el proyecto HEIMTSA (Hunt *et al.*, 2011) se implementaron varias encuestas de preferencias declaradas con el fin de determinar los valores unitarios para evitar enfermedades asociadas a la contaminación atmosférica, como los ataques de asma, la bronquitis crónica y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica. Existen varios estudios que analizaron la valoración de la mortalidad como un componente agregado de coste externo (Alberini *et al.*, 2006; Lindhjem *et al.*, 2011; Desaiques *et al.*, 2011). Desaiques *et al.* (2011), dentro del proyecto NEEDS, proporcionaron una estimación del valor monetario de un año de vida (VOLY, por sus siglas en inglés) de la UE-25, de alrededor 40.000 euros con un intervalo de confianza de 25.000 y 120.000 euros. Este valor puede variar entre países de la UE.

Teniendo en cuenta los beneficios que representa la reducción de la contaminación atmosférica por parte de la vegetación en la salud humana, resulta interesante valorar en términos monetarios este servicio ecosistémico. De esta manera, este trabajo tiene como objetivo evaluar la reducción de la contaminación del aire mediante el arbolado existente en el País Vasco y estimar su beneficio económico en términos de daños evitados en la salud humana. Este trabajo contribuye en la literatura científica aportando una valoración económica del arbolado en el País Vasco, que puede utilizarse para la estimación de análisis coste-beneficio en valoraciones económicas futuras.

2. DESCRIPCIÓN DEL CONTEXTO EN EL PAÍS VASCO

El País Vasco ocupa una superficie aproximada de 723.400 hectáreas, con una población en 2018 cercana a 2.199.000 habitantes. El Gran Bilbao y sus alrededores es una de las zonas más industrializadas de España y con una elevada densidad de población, lo que la convierte en una de las áreas metropolitanas más afectadas por la contaminación atmosférica, después de Madrid y Barcelona (Ibarra-Berastegi *et al.*, 2003; 2008; Gómez *et al.*, 2004). Al mismo tiempo, el País Vasco es la comunidad autónoma con mayor cobertura arbórea en España (alrededor del 49% de toda la superficie; ver gráfico nº 1) donde las especies más representadas son el pino de Monterrey (*Pinus radiata* D. Don), el cual ocupa alrededor del 31% de la cobertura arbórea total, seguido del haya (*Fagus sylvatica* L.), que ocupa alrededor del 14 % (Mapa Forestal, 2016).

Gráfico nº 1. COBERTURA ARBÓREA EN EL PAÍS VASCO (%)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Servicio de Monitoreo de Tierra de Copernicus (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2017b).

Las directrices de calidad del aire de la OMS establecen niveles de referencia para las concentraciones de contaminación atmosférica por encima de las cuales las concentraciones se consideran no saludables (OMS, 2006). Estos valores en los últimos años han sido superados en numerosas ocasiones en el País Vasco. Este trabajo ha calculado si los niveles recomendados de calidad del aire por la OMS se cumplieron en cada una de las estaciones de calidad del aire de la Agencia Vasca de Meteorología (Euskalmet) en 2016 para cada uno de los contaminantes evaluados en este trabajo. En el caso de la concentración media de NO_2 por hora, se encontró que el 97,7% de las estaciones excedieron los niveles de referencia de la OMS al menos una vez (valor de referencia = $40 \mu\text{g m}^{-3}$). Este nivel de referencia superó el 14,8% del tiempo al calcular la media en todas las estaciones. Sin embargo, en una escala de tiempo anual, el valor medio para NO_2 no excedió el valor de referencia en ninguna estación (valor de referencia = $200 \mu\text{g m}^{-3}$). Por su parte, la concentración de O_3 excedió el valor de referencia en todas las estaciones durante el 2,95% del tiempo (valor de referencia = $100 \mu\text{g m}^{-3}$). En el caso de PM_{10} , el valor de la media de 24 horas (valor de referencia = $50 \mu\text{g m}^{-3}$) y anual (valor de referencia = $20 \mu\text{g m}^{-3}$) excedieron el valor de referencia en el 97,5% y 62,5% de las estaciones respectivamente.

3. DATOS UTILIZADOS

En este trabajo se utilizan tres grandes bloques de datos. El primer bloque corresponde a datos de concentración atmosférica y meteorológicos. Para ello, se han utilizado los datos de las estaciones de calidad del aire de la Administración General de la Comunidad Autónoma del País Vasco (Gobierno Vasco, 2017). La Red de Control de Calidad del Aire del Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial y Vivienda del Gobierno Vasco cuenta con numerosos analizadores y monitores de medida que registran las concentraciones de contaminantes del aire. Los datos fueron recogidos del portal *online* GeoEuskadi que dispone de información de 53 estaciones de calidad del aire, de las cuales 47 estaciones incluyen datos por hora para el período estudiado (desde el 01/01/2016 a las 00:00 hasta el 31/12/2016 a las 23: 59). Los datos utilizados son horarios e incluyen concentración de NO_2 , O_3 , SO_2 y PM_{10} en 2016. Los datos meteorológicos utilizados también son horarios e incluyen velocidad del viento, precipitación, humedad relativa, presión, radiación solar y temperatura del aire.

El segundo bloque de datos corresponde a datos de características de las plantas, que se dividen en dos subgrupos. El primer subgrupo corresponde a datos de índice de área foliar, los cuales se obtuvieron a partir del satélite de la NASA MODIS con una resolución espacial de 500 m (Myneni *et al.*, 2015). Como MODIS proporciona datos cada ocho días, se descargaron 45 mapas en formato ráster de índice de área foliar en el País Vasco en 2016 para cubrir todo el año. Los valores en cada celda del mapa se convirtieron en datos por hora asumiendo valores constantes durante períodos de ocho días. El otro subgrupo corresponde a datos de resistencias y conductancias específicos de cada gas contaminante recogidos de la literatura a partir de estudios experimentales.

El tercer bloque corresponde a datos sin variación temporal dentro del año 2016, como densidad de población, densidad de carreteras, cobertura arbórea, uso del suelo. Los datos de densidad de población se obtuvieron del Centro para la Red Internacional de Información de Ciencias de la Tierra (CIESIN) (2017) y los datos de densidad de carreteras, del OpenStreetMap (2015). Los datos de cobertura arbórea se obtuvieron de la capa ráster Tree Cover Density, con una resolución de 20 m, del Servicio de Monitoreo de Tierra de Copernicus (ver gráfico nº 1). Los datos de uso del suelo se obtuvieron de la capa ráster CORINE Land Cover (CLC, 2018), con una resolución de 100 m, del Servicio de Monitoreo de Tierra de Copernicus (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2017b).

4. METODOLOGÍA

La metodología de este trabajo estima primero la eliminación de contaminantes mediante deposición seca a nivel regional y posteriormente calcula el valor económico de los árboles en el País Vasco por reducir los niveles de contaminación atmosférica.

El análisis computacional se llevó a cabo utilizando el paquete TreeDep (García de Jalón, 2018) del software R (R Development Core Team, 2017) disponible en el

repositorio CRAN. TreeDep estima la eliminación de la contaminación del aire por deposición seca en la vegetación a través de variables a nivel horario, como la resistencia aerodinámica, la resistencia de la capa límite, la resistencia de la copa, la resistencia estomática, la resistencia cuticular, la resistencia mesofílica, la resistencia del suelo, la velocidad de fricción y la velocidad de deposición. TreeDep, además, permite plotear los resultados para determinados períodos de tiempo.

En TreeDep, al igual que en la mayoría de modelos, la cantidad de material que se deposita en la vegetación por unidad de superficie y tiempo, se calcula como el producto de la velocidad de deposición, la concentración de contaminantes y la cubierta vegetal (Ecuación nº 1) (Hicks *et al.*, 1985; Pederson *et al.*, 1995; Nowak *et al.*, 2006; Janhall, 2015).

$$DT_{p,t} = Vd_{p,t} * C_{p,t} * LAI_{t,sp} \quad (1)$$

donde $DT_{p,t}$ es la cantidad depositada de contaminante p por unidad de superficie en cada instante t ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$), $Vd_{p,t}$ es la velocidad de deposición (m s^{-1}), $C_{p,t}$ es la concentración de contaminante p (g m^{-3}) en cada hora y $LAI_{t,sp}$ es el índice del área foliar de la copa de los árboles en cada instante de tiempo. El índice de área foliar es la superficie de hoja dividido por la superficie de suelo debajo de la copa de los árboles.

La velocidad de deposición ($Vd_{p,t}$) representa la eficiencia de la eliminación de contaminantes debido a la deposición seca. Para NO_2 , O_3 , SO_2 , la velocidad de deposición se calcula en función de tres grupos de resistencias (Pederson *et al.*, 1995; Hicks *et al.*, 1987) (Ecuación nº 2):

$$Vd_{p,t} = \frac{1}{Ra_t + Rb_{p,t} + Rc_{p,t}}, \quad (2)$$

donde Ra_t es la resistencia aerodinámica, $Rb_{p,t}$ es la resistencia de la capa límite cuasi laminar y $Rc_{p,t}$ es la resistencia de la copa o superficie (s m^{-1}). Para limitar las estimaciones de deposición a períodos de deposición seca, se ajustó el valor material depositado a cero durante las horas de lluvia (Nowak *et al.*, 2006). Siguiendo a Nowak *et al.* (2006) y Hirabayashi *et al.* (2015), para la velocidad de deposición de PM_{10} ($Vd_{pM10,t}$) se estableció un valor constante durante el período con hojas, lo que podría considerarse una estimación aproximada, ya que la velocidad de deposición depende del tamaño de partícula.

Ra_t y $Rb_{p,t}$ se calcularon en función de la velocidad de fricción y otras variables meteorológicas. La velocidad de fricción es un parámetro de escala que describe el esfuerzo cortante y la turbulencia atmosférica en la capa límite que afecta la dispersión de contaminantes (Prandtl, 1925).

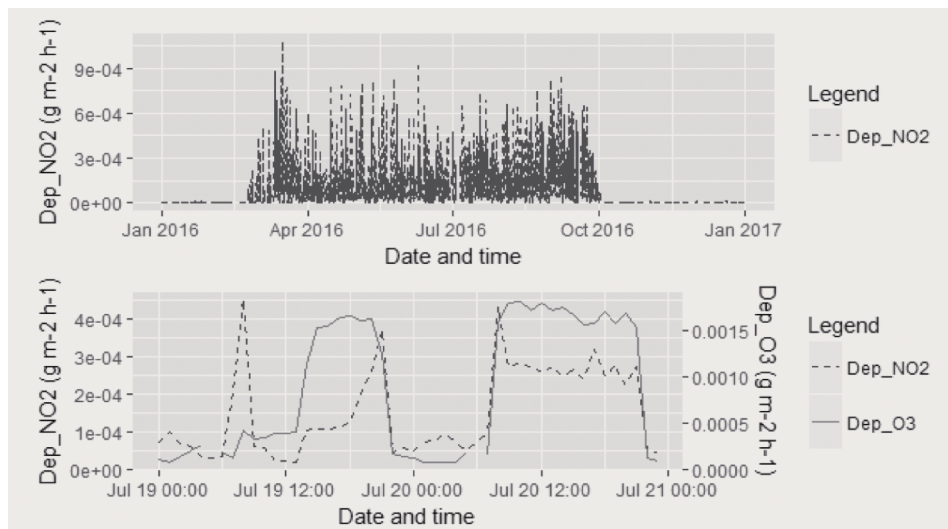
La resistencia de la copa o superficie ($Rc_{p,t}$) es la resistencia neta correspondiente a toda la superficie de la planta y generalmente domina y controla la velocidad de deposición (Pederson *et al.*, 1995). (Ecuación nº 3):

$$Rc_{p,t} = \frac{1}{\frac{1}{r_{s_t} + r_{m_p}} + \frac{1}{r_{soil_t}} + \frac{1}{r_{t_p}}}, \quad (3)$$

donde r_{s_t} es la resistencia estomática en el instante t , r_{m_p} es la resistencia mesófila para cada contaminante, r_{soil_t} es la resistencia del suelo para cada instante t , y r_{t_p} es la resistencia cuticular de cada contaminante. La resistencia estomática es la que fundamentalmente rige la resistencia de la copa. Su cálculo se hizo en función de la actividad fotosintética a nivel horario utilizando la solución analítica para la fotosíntesis de hojas acopladas desarrollada por Baldocchi (1994).

El gráfico nº 2 muestra un ejemplo del cálculo de la deposición de NO_2 y O_3 atmosférica calculada por hora y unidad de superficie cubierta de árboles de hoja caduca en la estación de Durango en 2016. Como se muestra en la parte superior del gráfico, la mayor parte de la deposición seca se produce durante el período en el que los árboles tienen hojas, entre abril y noviembre. En la parte inferior del gráfico vemos que, en comparación con las horas nocturnas, la deposición suele ser más alta durante las horas diurnas. Esto sucede principalmente durante la noche, porque al no producirse casi actividad fotosintética, las estomas de la hoja se cierran. Como consecuencia, la resistencia estomática aumenta y la velocidad de deposición disminuye.

Gráfico nº 2. **EJEMPLO DEL CÁLCULO DE LA DEPOSICIÓN DE NO_2 Y O_3 ATMOSFÉRICA CALCULADA POR HORA Y UNIDAD DE ÁREA CUBIERTA DE ÁRBOLES DE HOJA CADUCA EN LA ESTACIÓN DE DURANGO (enero 2016-enero 2017)**



Nota: El gráfico superior muestra la deposición de NO_2 para todo el año en 2016. El gráfico inferior muestra la deposición de NO_2 y O_3 entre el 19 y 20 de julio de 2016.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la red de estaciones de calidad de aire de Euskalmet.

Posteriormente se realizó el análisis de deposición seca de los contaminantes a escala regional en el País Vasco. Para ello, se hizo correr el modelo TreeDep en cada una de las celdas del mapa ráster, con una resolución de 1km x 1km. Para obtener datos meteorológicos y de concentración atmosférica, se realizó una interpolación espacial mediante una regresión de uso del suelo (ver García de Jalón *et al.* (2019) para más detalle de la interpolación espacial).

Una vez calculado el material contaminante depositado en los árboles en cada celda del mapa del País Vasco, la cantidad de contaminante depositado fue transformado a términos monetarios. Nowak *et al.* (2014) estimaron varias ecuaciones de regresión univariante que estiman el valor económico por tonelada de material depositado en función de la densidad de población que vive en un determinado lugar. En estas regresiones (ecuación nº 4), el beneficio en términos monetarios depende del impacto positivo sobre la salud, el cual viene determinado por el número de personas expuestas a dicha mejora en la calidad del aire. Para la estimación de las regresiones, los autores utilizaron funciones de concentración-respuesta mediante la estimación del cambio en los efectos adversos para la salud, debido al cambio en las concentraciones de contaminantes. Las funciones de impacto en la salud relacionan un cambio en la concentración de contaminantes con un cambio en la incidencia de un punto final de salud (es decir, mortalidad prematura). Estas funciones se derivan típicamente de la relación estimada entre la concentración de un contaminante y los efectos adversos para la salud que sufre una población determinada. Este trabajo transfirió los coeficientes estimados en las ecuaciones teniendo en cuenta el cambio de moneda y la diferencia temporal mediante el factor de conversión de Paridad del Poder Adquisitivo (PPA) y el Índice de Precios del Consumidor (IPC) respectivamente. A continuación, se describen las regresiones utilizadas para cada contaminante:

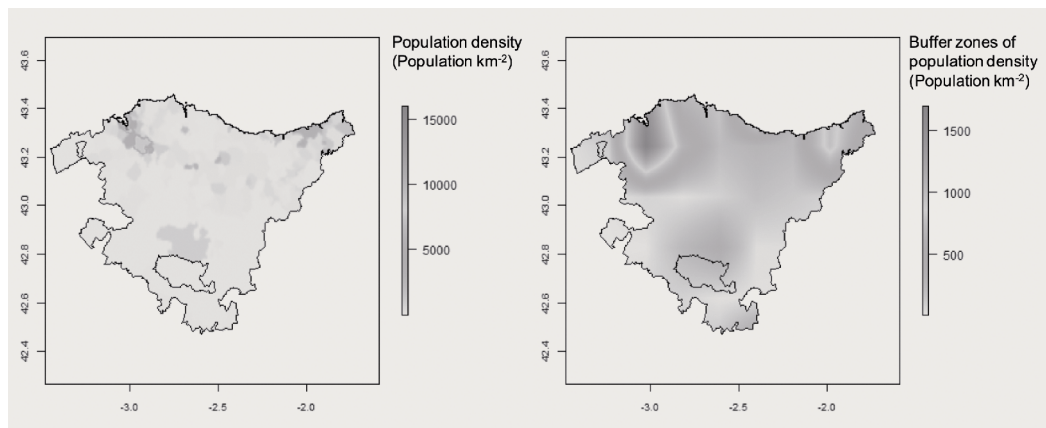
$$\begin{aligned}y_{NO_2} &= 0.6634545 + 0.5694545 * \text{Densidad de población}, \\y_{O_3} &= 8.606091 + 3.189909 * \text{Densidad de población}, \\y_{PM_{10}} &= 389.0919 + 110.7149 * \text{Densidad de población}, \\y_{SO_2} &= 0.1310909 + 0.1357273 * \text{Densidad de población}\end{aligned}\tag{4}$$

donde y representa el valor económico estimado en cada una de las celdas medido en euros por tonelada del contaminante depositado. La densidad de población se mide en habitantes por kilómetro cuadrado.

Los contaminantes del aire, teniendo en cuenta su vida media, pueden recorrer grandes distancias más allá del foco emisor debido a la acción de las corrientes de aire en la atmósfera. Por ese motivo es importante utilizar una resolución espacial adecuada para analizar el efecto de la densidad de población en el cálculo del valor económico de la mejora de calidad de aire. Para ello, en este paso del análisis, la resolución espacial de la densidad de población fue disminuida con el fin de generar zonas de amortiguamiento de densidad de población mediante el cálculo del valor

promedio en las celdas del mapa ráster. El gráfico nº 3 muestra la densidad de población en el País Vasco (mapa de la izquierda) y la densidad de población calculando valores medios de amortiguamiento (mapa de la derecha). A partir de los valores medios de la densidad de población (mapa de la derecha), se calculó el valor económico utilizando las regresiones de la Ecuación nº 4.

Gráfico nº 3. **DENSIDAD DE POBLACIÓN EN EL PAÍS VASCO**



Nota: El mapa de la izquierda muestra la densidad de población en (habitantes por kilómetro cuadrado). El mapa de la derecha muestra zonas de amortiguamiento de la densidad de población.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la NASA.

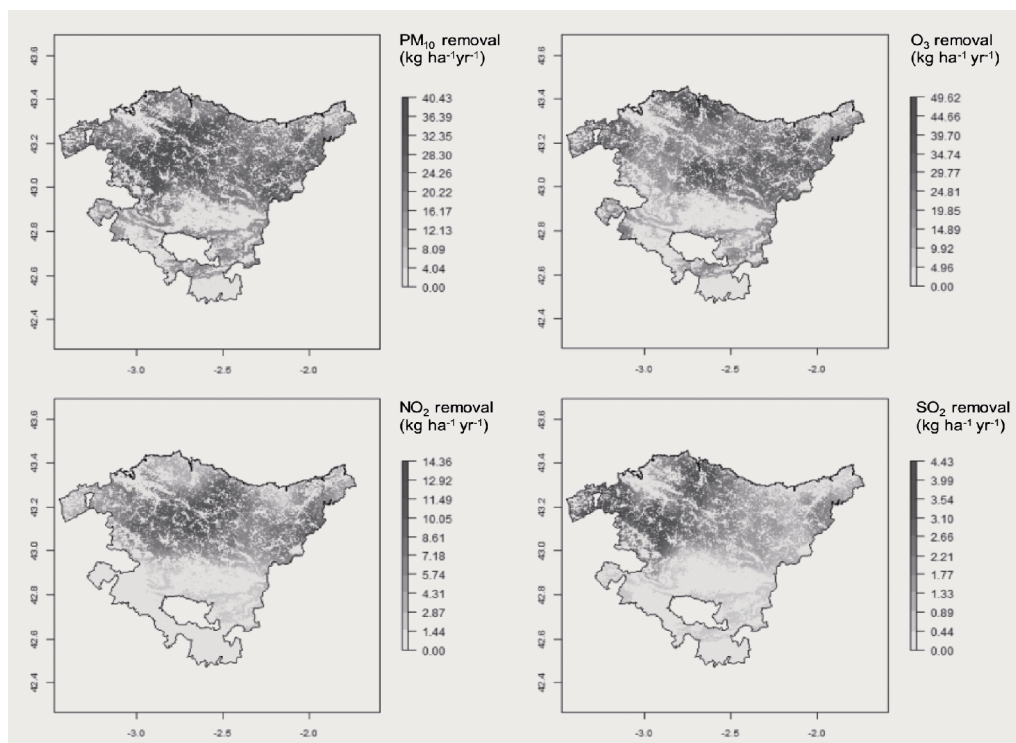
5. EL VALOR ECONÓMICO DE LOS ÁRBOLES POR REDUCIR LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La reducción de la contaminación del aire por el arbolado varía considerablemente dentro del País Vasco. Esto se debe principalmente a diferencias entre concentraciones de contaminantes y variables meteorológicas, como la velocidad del viento, temperatura del aire, precipitación, humedad relativa, presión, radiación solar y variables específicas del arbolado como el índice de área foliar o la cobertura arbórea. El gráfico nº 4 muestra la distribución espacial de material contaminante depositado en 2016. El mapa muestra que la reducción de la contaminación del aire es muy baja en áreas con baja densidad de cobertura arbórea, como las comarcas de Llanada Alavesa, Valles Alaveses y Rioja Alavesa, principalmente ocupadas por cultivos arables y viñedos (ver gráfico nº 1 para apreciar la cobertura arbórea).

La deposición media de NO_2 fue de alrededor de $3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, con un rango de 0 a $14.36 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Los valores de deposición por encima del percentil 95 se midieron durante el período diurno. Una gran cantidad de NO_2 se depositó en los

extensos bosques de las comarcas de alrededor del área metropolitana de Bilbao, como Arratia-Nerviñ, Duranguesado, Markina-Ondarroa, Estribaciones del Gorbea, Alto Deba, Bajo Deba y en menor medida en comarcas alrededor de San Sebastián, como Tolosa. Esto puede explicarse por el desplazamiento y la deposición de gases NO_x generados por carreteras y áreas densamente pobladas en núcleos cercanos. En el caso de PM_{10} , la deposición media fue de alrededor de $12,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, con un rango de 0 a $40,43 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. En cuanto a la distribución de la mayor parte del material particulado depositado, son principalmente las mismas comarcas que con NO_2 , más Encartaciones y Goierri. En el caso del ozono, los valores más altos se obtuvieron entre junio y agosto en áreas alejadas de los grandes núcleos urbanos: bosques de Gernika-Bermeo, Markina-Ondarroa y Estribaciones del Gorbea. La deposición media de O_3 fue de alrededor de $12,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, con un rango de 0 a $49,62 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. La mayor parte del SO_2 se depositó en los bosques que rodean el área metropolitana de Bilbao: Encartaciones, Cantábrica Alavesa, Arratia-Nerviñ, Duranguesado y Gernika-Bermeo. La deposición media de SO_2 fue de alrededor de $0,8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, desde 0 a $4,43 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Gráfico nº 4. **ELIMINACIÓN ANUAL DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS POR DEPOSICIÓN SECA EN ÁRBOLES EN 2016 EN EUSKADI**



Fuente: Elaboración propia a partir de los cálculos explicados en el texto.

Los resultados muestran que los valores máximos de la deposición se producen durante los periodos en que los árboles tienen hoja, dado que la tasa fotosintética que regula la apertura de estomas domina la velocidad de deposición. En el caso de NO_2 , los valores más altos de deposición horaria se encuentran en la estación de calidad del aire 'Easo' (Percentil95 = $1.45 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Los valores de deposición por encima del percentil 95 se midieron durante el día. Para O_3 , los valores más altos se registraron en 'Jaizkibel' (Percentil95 = $3.63 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) desde las 13:00 hasta las 17:00 horas entre junio y agosto. Para SO_2 , los valores más altos se registraron en 'Santurce' (Percentil95 = $0.55 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) desde las 6:00 hasta las 13:00 horas entre mayo y octubre. Para PM_{10} , los valores más altos también se registraron en 'Erandio' (Percentil95 = $0.93 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) entre mayo y octubre. Por el contrario, la mínima eliminación de contaminantes por el arbolado se produjo en los meses de invierno, coincidiendo cuando los árboles no tenían hoja. Los valores mínimos fueron cercanos a $0 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ para todos los contaminantes.

El cuadro nº 1 muestra la reducción de contaminantes por deposición seca en todo el territorio del País Vasco. En 2016, se calcula que se eliminaron alrededor de 9.325 t año^{-1} de O_3 por deposición seca en País Vasco, lo que representó un beneficio económico de alrededor de 11,8 millones de euros al año, asumiendo un valor constante de la externalidad (1.269 € t^{-1}) y de 10,5 millones de euros al año teniendo en cuenta la población expuesta a las concentraciones de ozono. El material particulado (PM_{10}) es el segundo contaminante más reducido por deposición con alrededor de 9.158 t año^{-1} . Sin embargo, el beneficio económico de la reducción de material particulado es considerablemente mayor que el beneficio de reducir ozono. En este caso, el valor económico varía sustancialmente si se tiene en cuenta o no la población que estaba expuesta a la contaminación reducida. Sin considerar la población expuesta, el beneficio se estima en alrededor de 34,4 millones de euros al año, mientras que cuando se considera la población el valor económico asciende a 90,7 millones de euros. El dióxido de nitrógeno también presenta una gran diferencia en la estimación cuando se considera la población expuesta. En total se redujeron alrededor de 2.192 t año^{-1} de NO_2 , lo que supuso un beneficio de 12,3 millones de euros al año y 0,5 millones de euros al año si consideramos la población expuesta. El dióxido de azufre fue el contaminante que menos se redujo, ya que la concentración de dicho contaminante es considerablemente más baja que el resto. Las 608 toneladas que se redujeron en 2016 representaron un beneficio de 0,8 millones de euros sin considerar la población expuesta y de 36.000 euros considerando la población expuesta. El valor económico total de la reducción de todos los contaminantes estudiados en este trabajo, fue de alrededor de 101,7 millones de euros al año considerando la población expuesta. Dicho valor económico representa alrededor del 0,14% del Producto Interno Bruto del País Vasco en 2018.

Cuadro nº 1. **ELIMINACIÓN ANUAL DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE POR DEPOSICIÓN SECA DE ÁRBOLES EN EUSKADI Y SU VALOR ECONÓMICO**

Contaminante	Reducción de la contaminación		Valor de la externalidad (€ t-1)	Valor económico de la reducción de la contaminación	
	(t)	Intervalo de confianza sobre la media del 5% y 95% (t)		Sin considerar la densidad de población (€)	Considerando la densidad de población (€)
NO ₂	2.191,9	(2.182,3 – 2.208,3)	5.628 ^a	12.336.024	496.715
O ₃	9.324,6	(9.282,6 – 9.368,4)	1.269 ^a	11.832.950	10.453.511
SO ₂	607,7	(605,3 – 612,8)	1.378 ^a	837.350	36.301
PM ₁₀	9.158,2	(9.116,1 – 9.197,7)	3.757 ^b	34.407.523	90.666.166
Total				59.413.847	101.652.694

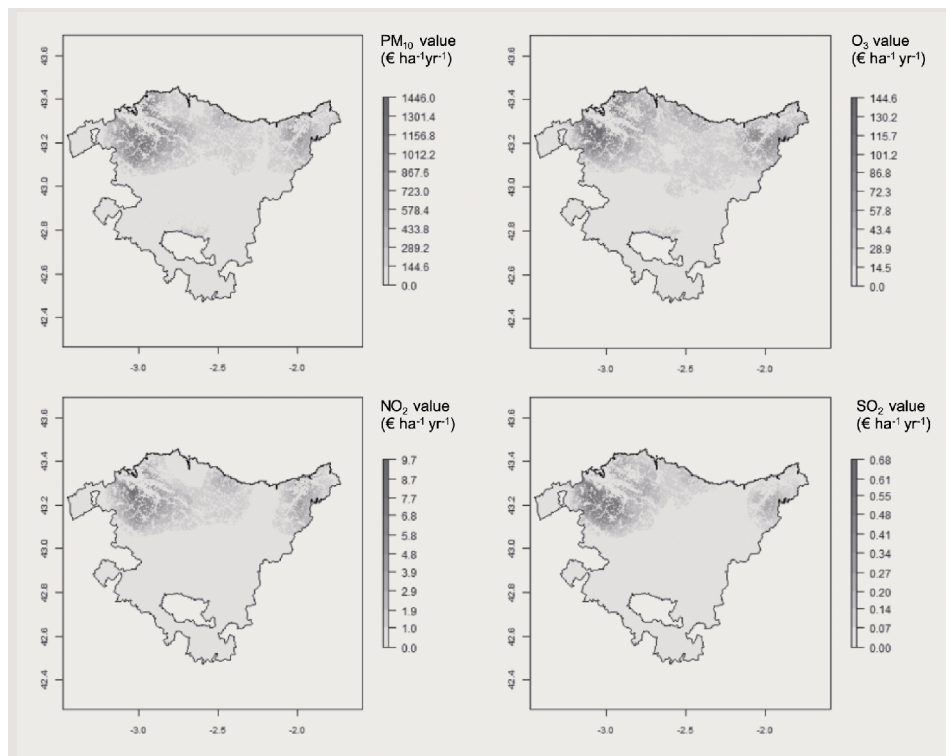
(a) Valor transferido de Murray (1994) y Nowak et al. (2006)

(b) Valor transferido de RWDI (2006)

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Servicio de Monitoreo de Tierra de Copernicus (Agencia Europea de Medio Ambiente 2017b).

El uso de sistemas de información geográfica permite analizar espacialmente el valor económico de la eliminación de la contaminación del aire (gráfico nº 5). Como se muestra en los mapas, los bosques que más contribuyen en el beneficio económico de la deposición son los que se encuentran al sur del área metropolitana de Bilbao (principalmente en las comarcas de Encartaciones, Cantábrica Alavesa, Gran Bilbao, Arratia-Nervión, Duranguesado y Plentzia-Mungia) seguido de los bosques al sur de San Sebastián (principalmente en Donostialdea). Es importante destacar que la reducción del material particulado domina considerablemente el valor total estimado de la deposición seca. Esto se debe a tres razones principales: a) la cantidad del contaminante que ha sido depositada en el arbolado y eliminada de la atmósfera; b) la cantidad de población expuesta a esa reducción (determinada por la densidad de población); y c) el valor de la externalidad de la reducción de la contaminación (determinada por los coeficientes de la ecuación nº 4 para cada contaminante). En cuanto a usos de suelos, el uso denominado por el mapa CORINE del programa europeo Copernicus como «Bosques y áreas semi-naturales» es el que proporciona un mayor beneficio económico, seguido de las zonas agrícolas de la región vasca incluyendo pastizales y cultivos herbáceos y leñosos.

Gráfico nº 5. **BENEFICIO ECONÓMICO ESTIMADO DE LA ELIMINACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE MEDIANTE EL ARBOLADO EN EL PAÍS VASCO**



Fuente: Elaboración propia a partir de los cálculos explicados en el texto.

6. IMPLICACIONES Y CONCLUSIONES

La valoración económica de los beneficios del arbolado resulta una herramienta de utilidad en la toma de decisiones y diseño de políticas de la gestión forestal y usos del suelo. Además, este tipo de valoraciones puede ser usado de forma similar en el diseño de políticas relacionadas con la adaptación al cambio climático o la evaluación de impacto ambiental de planes y proyectos. De esta manera, los árboles plantados en zonas estratégicas, como pueden ser zonas alrededor de grandes ejes de comunicación, además de servir como *buffer* para la contaminación, también amortiguan otros impactos, como por ejemplo acústicos o paisajísticos.

En este análisis se ha simulado la deposición seca de NO₂, O₃, SO₂ y PM₁₀ en los árboles del País Vasco a partir de datos horarios en 2016 de concentración de contaminantes y meteorológicos recogidos por la red de estaciones de calidad de aire de Euskalmet y a partir de los datos de índice área foliar del satélite MODIS de NASA.

Según la Agencia Europea Ambiental, los contaminantes evaluados aquí son los más importantes en términos de daño a la salud humana (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2017a). Los resultados muestran que la deposición seca de árboles en el País Vasco en el año 2016 fue de alrededor de 9.325 toneladas de O_3 , 9.158 toneladas de PM_{10} , 2.192 toneladas de NO_2 y 608 toneladas de SO_2 . El beneficio económico total estimado de la reducción de estos contaminantes es de alrededor de 102 millones de euros al año, lo que representa alrededor del 0,14% del Producto Interno Bruto del País Vasco en 2018. Aproximadamente el 89% de este valor económico corresponde a la deposición del material particulado.

Existen diferencias entre la distribución geográfica de la reducción de la contaminación y el valor económico. Esto depende fundamentalmente del número de personas que están expuestas o son directamente beneficiadas por la mejora de la calidad del aire. De esta manera, dado que el beneficio económico por unidad de superficie arbolada depende de la población expuesta, se puede afirmar que, a igualdad de condiciones, el valor económico del servicio de regulación de calidad del aire de un árbol en el centro de la ciudad es mayor que el de un árbol alejado de la misma, ya que el beneficio es percibido por un número mayor de personas.

La concentración del contaminante es un gran determinante del potencial para reducir la contaminación por deposición. La concentración del contaminante está frecuentemente relacionada con el desarrollo de la industria, el transporte y la densidad de población. Esto sucede en el País Vasco, donde, a excepción del ozono, se produce una mayor reducción de contaminantes atmosféricos en bosques cercanos a áreas con alto desarrollo industrial y densidad de población. De esta manera, se explica que la reducción de contaminantes y, por tanto, los beneficios, sean considerablemente menores en Álava, comparada con Bizkaia y Gipuzkoa. En el caso del ozono, a pesar de ser el contaminante que más se reduce a través de la deposición seca en los árboles, estos también contribuyen en gran medida a la formación de nuevas moléculas de O_3 . Los árboles emiten oxígeno y compuestos orgánicos volátiles (VOC, por sus siglas en inglés) que en presencia de la luz solar reaccionan con óxidos de nitrógeno y otras sustancias químicas para formar O_3 . Esto habría que tenerlo en cuenta en el futuro a la hora de monetizar los beneficios de la deposición de ozono atmosférico.

Los bosques y las áreas seminaturales dominan el beneficio económico de regulación de calidad del aire. Esto se explica porque la densidad de la cubierta arbórea y el índice de área foliar tienen una gran influencia en la cantidad del material depositado por unidad de superficie. Sin embargo, aunque la mayor parte de la contaminación del aire se elimina en zonas rurales y poco pobladas, como suelen ser los bosques y las áreas seminaturales del País Vasco, la mayoría de los impactos de la contaminación del aire en la salud humana se producen en zonas urbanas. Esto se ve reflejado en la estimación espacial del beneficio económico. Por otro lado, el hecho de que sea en zonas menos pobladas donde se deposita la mayor cantidad de conta-

minante, podría tener implicaciones interesantes en las políticas de conservación de bosques, puesto que los beneficiarios de la reducción de la contaminación son diferentes a las personas que viven donde se produce el servicio. De este modo, la valoración económica podría aportar información útil en contextos del pago por servicios ambientales o incluso ayudar a implementar medidas de fiscalidad verde.

Este trabajo estima el valor económico de la reducción de concentración de varios contaminantes atmosféricos por parte del arbolado, el cual es un servicio de regulación dentro de un gran número de servicios ecosistémicos que los árboles proporcionan para la sociedad (Moreno *et al.*, 2018; Kay *et al.*, 2018). De esta manera, para la estimación del valor total del beneficio económico del arbolado y poder incluirlo en un análisis coste-beneficio, sería necesario la cuantificación y monetización del resto de servicios (García de Jalón *et al.*, 2018; Kay *et al.*, 2019). Por otro lado, resulta importante tener en cuenta que el beneficio estimado aumentaría si la superficie arbolada aumentase o si se concentrase una mayor proporción de arbolado en zonas urbanas y en sus proximidades, ya que la mejora de la calidad del aire beneficiaría a una mayor parte de la población. Sin embargo, aumentar y mantener la cobertura arbórea puede suponer unos costes significativos, los cuales son probablemente más elevados en zonas urbanas, debido entre otras razones a que el precio del suelo urbano es mayor y, por lo tanto, también lo sea el coste de oportunidad.

Finalmente, un análisis de simulación a nivel horario basado en datos observados de concentración de contaminantes, meteorológicos y de densidad de población expuesta a los contaminantes, parece ser un enfoque particularmente apropiado para una estimación de forma objetiva, clara y transparente de los beneficios económicos proporcionados por los árboles en la reducción de la contaminación del aire.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGENCIA DE PROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE DE ESTADOS UNIDOS (2012): «Environmental Benefits Mapping and Analysis Program - Community Edition (BenMAP-CE)». Disponible en: <https://www.epa.gov/benmap>
- AGENCIA EUROPEA DE MEDIO AMBIENTE (2017a): «Air quality in Europe - 2017 report», *Publications Office of the European Union*, Luxembourg. doi:10.2800/358908.
- (2017b): «Copernicus Land Service - Pan-European Component: CORINE Land Cover». Disponible en: <http://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012?tab=download>
- ALBERINI, A.; HUNT, A.; MARKANDYA, A. (2006): «Willingness to Pay to Reduce Mortality Risks: Evidence from a Three-country Contingent Valuation Study», *Environmental and Resource Economics*, 33 (2): 251-264.
- BALDOCCHI, D. (1994): «An analytical solution for coupled leaf photosynthesis and stomata conductance models», *Tree Physiol.*, 14: 1069-1079.
- CENTRO PARA LA RED INTERNACIONAL DE INFORMACIÓN DE CIENCIAS DE LA TIERRA (2017): «Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4): Population Density, Revision 10». Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). Columbia University, USA. <https://doi.org/10.7927/H4DZ068D>
- DAVIDSON, K.; HALLBERG, A.; MCCUBBIN, D.; HUBBELL, B. (2007): «Analysis of PM_{2.5} using the environmental benefits mapping and analysis program (BenMAP)», *J. Toxicol. Environ. Health*, 70: 332-346.
- DESAIGUES, B. *et al.* (2011): «Economic valuation of air pollution mortality: A 9-country contingent valuation survey of value of a life year (VOLY)», *Ecological Indicators*, 11(3): 902-910.
- DÍAZ, J.; ORTIZ, C.; FALCÓN, I.; LINARES, C. (2018a): «Short-term effect of tropospheric ozone on daily mortality in Spain», *Atmospheric Environment*, 187: 107-16.
- DÍAZ JIMÉNEZ, J.; LINARES GIL, C. (2018b): «Impacto de la contaminación atmosférica sobre la mortalidad diaria a corto plazo en España», *Rev. Salud Ambient.*, 18(2): 120-136.
- ESCOBEDO, F.J.; KROEGER, T.; WAGNER, J.E. (2011): «Urban forests and pollution mitigation: analyzing ecosystem services and disservices», *Environmental Pollution*, 159: 2078-2087.
- GARCÍA DE JALÓN, S.; BURGESS, P.J.; CURIEL YUSTE, J.; MORENO, G.; GRAVES, A.; PALMA, J.H.N.; CROUS-DURÁN, J.; KAY, S.; CHIABAI, A. (2019): «Dry deposition of air pollutants on trees at regional scale: a case study in the Basque Country», *Agricultural and Forest Meteorology*, 278: 107648.
- GARCÍA DE JALÓN, S.; GRAVES, A.; PALMA, J.H.N.; WILLIAMS, A.; UPSON, M.; BURGESS, P.J. (2018): «Modelling and valuing the environmental impacts of arable, forestry and agroforestry systems: a case study», *Agroforestry Systems*, 92 (4): 1059-1073. DOI: 10.1007/s10457-017-0128-z.
- GARCÍA DE JALÓN, S. (2018): «R Package 'TreeDep'. TreeDep: Air Pollution Removal by Dry Deposition on Trees». Disponible en: <https://cran.r-project.org/web/packages/TreeDep/index.html>
- GOBIERNO VASCO (2017): «Open Data Euskadi. Portal de acceso a los datos públicos del Gobierno Vasco». Disponible en: <http://opendata.euskadi.eus/>
- GÓMEZ, M.C.; DURANA, N.; NAVAZO, M.; ALONSO, L.; GARCÍA, J.A.; ILARDIA, J.L. (2004): «Application of validation data tests from an on-line volatile organic compound analyser to the detection of air pollution episodes in urban areas», *Anal. Chim., Acta* 524: 41-49.
- HICKS, B.B.; BALDOCCHI, D.D.; MEYERS, T.P.; HOSKER, R.P.; MATT, D.R. (1987): «A preliminary multiple resistance routine for deriving dry deposition velocities from measured quantities», *Water, Air, and Soil Pollution*, 36: 311-330.
- HICKS, B.D.; BALDOCCHI, D.D.; HOSKER, R.P.; HUTCHISON, B.A.; MATT, D.R.; MCMILLEN, R.T.; SATTERFIELD, L.C. (1985): «On the use of monitored air concentrations to infer dry deposition», *NOAA Technical Memorandum ERL ARL-141*, Air Resources Laboratory, Silver Springs, MD.
- HIRABAYASHI, S.; KROLL, C.N.; NOWAK, D.J. (2015): «i-Tree Eco Dry Deposition Model

Descriptions. i-Tree Eco model». Disponible en: https://www.itreetools.org/eco/resources/iTree_Eco_Dry_Deposition_Model_Descriptions.pdf

- HUNT, A. *et al.* (2011): «Monetary values for health end-points used in the HEIMTSA/INTARESE Common Case Study», *Deliverable 4.1.2 of the HEIMTSA Project*.
- IBARRA-BERASTEGI, G.; ELIAS, A.; AGIRRE, E.; URIA, J. (2003): «Traffic congestion and ozone precursor emissions in Bilbao (Spain)», *Environ. Sci. Pollut.*, R. 10: 361-367.
- IBARRA-BERASTEGI, G.; ELIAS, A.; BARONA, A.; SAENZ, J.; EZCURRA, A.; DIAZ DE ARGANDOÑA, J. (2008): «From diagnosis to prognosis for forecasting air pollution using neural networks: Air pollution monitoring in Bilbao», *Environ. Modell. Softw.*, 23: 622-637.
- JANHALL, S. (2015): «Review on urban vegetation and particle air pollution - Deposition and dispersion», *Atmos. Environ.*, 105: 130-137.
- KAY, S.; CROUS-DURÁN, J.; GARCÍA DE JALÓN, S.; GRAVES, A.; PALMA, J.H.N.; SZERENCITS, E.; WEIBEL, R.; HERZOG, F. (2018): «Landscape-scale modelling of agroforestry ecosystem services: A methodological approach», *Landscape Ecology*, 33 (9): 1633-1644.
- KAY, S.; GRAVES, A.; PALMA, J.H.N.; MORENO, G.; ROCES-DÍAZ, J.V.; AVIRON, S.; CHOUVARDAS, D.; CROUS-DURAN, J.; FERREIRO-DOMÍNGUEZ, N.; GARCÍA DE JALÓN, S.; MCICAN, V.; MOSQUERA-LOSADA, M.R.; PANTERA, A.; SANTIAGO-FREIJANES, J.J.; SZERENCITS, E.; TORRALBA, M.; BURGESS, P.J.; HERZOG, F. (2019): «Agroforestry is paying off - Economic evaluation of ecosystem services in European landscapes with and without agroforestry systems», *Ecosystem Services*, 36: 100896.
- LIANG, S.; LI, X.; WANG, J. (2012): «Advanced Remote Sensing: Terrestrial Information Extraction and Applications», *Academic Press*.
- LINARES, C.; FALCÓN, I.; ORTIZ, C.; DÍAZ, J. (2018): «An approach estimating the short-term effect of NO₂ on daily mortality in Spanish cities», *Environment International*, 116: 18-28.
- LINDHJEM, H.; NAVRUD, S.; BRAATHEN, N.A.; BIAUSQUE, V. (2011): «Valuing Mortality Risk Reductions from Environmental, Transport, and Health Policies: A Global Meta-Analysis of Stated Preference Studies», *Risk Analysis*, 31(9): 1381-1407.
- LOCKWOOD, A.L.; FILLEY, T.R.; RHODES, D.; SHEPSON, P.B. (2008): Foliar uptake of atmospheric organic nitrates. *Geophys. Res. Lett.* 35: L15809.
- MAPA FORESTAL (2016): «Mapa forestal 2016 - 2016ko baso mapa. Inventario forestal 2016-2018. Comunidad Autónoma del País Vasco, Territorios Históricos y Comarcas». Disponible en: http://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/inventario_forestal_2016/es_agripes/adjuntos/TTHH-CAPV-COMAR-CAS2016.pdf
- MORENO, G.; AVIRON, S.; BURGESS, P.J.; CROUS-DURAN, J.; FRANCA, A.; GARCÍA DE JALÓN, S.; HARTEL, T.; MIRCK, J.; PANTERA, A.; PALMA, J.H.N.; PAULO, J.A.; RE, G.A.; SANNA, F.; THENAIL, C.; VARGA, A.; VIAUD, V. (2018): «Agroforestry systems of high nature and cultural value in Europe: provision of commercial goods and other ecosystem services», *Agroforestry Systems*, 92 (4): 877-891.
- MURRAY, F.J.; MARSH, L.; BRADFORD, P.A. (1994): «New York State energy plan, Vol. II: issue reports», *New York State Energy Office*, Albany, NY.
- MYNENI, R.; KNYAZIKHIN, Y.; PARK, T. (2015): «MOD15A2H MODIS Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006», *NASA EOSDIS Land Processes DAAC*. Disponible en: <http://doi.org/10.5067/MODIS/MOD15A2H.006>
- NOWAK, D.J.; CRANE, D.E.; STEVENS, J.C. (2006): «Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States», *Urban Forestry and Urban Greening*, 4: 115-123.
- NOWAK, D.J.; HIRABAYASHI, S.; BODINE, A.; GREENFIELD, E. (2014): «Tree and forest effects on air quality and human health in the United States», *Environ. Pollut.*, 193: 119-129.
- NOWAK, D.J.; HIRABAYASHI, S.; BODINE, A.; HOEHN, R. (2013): «Modeled PM_{2.5} removal by trees in ten U.S. cities and associated health effects», *Environ. Pollut.*, 178: 395-402.
- NOWAK, D.J.; HIRABAYASHI, S.; DOYLE, M.; MCGOVERNC, M.; PASHER, J. (2018): «Air pollution removal by urban forests in Canada and its effect on air quality and human health», *Urban Forestry & Urban Greening*, 29: 40-48.
- OMS (2006): «Organización Mundial de la Salud. Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide.

- Global update 2005. Summary of risk assessment», *World Health Organization*. Disponible en: http://apps.who.int/iris/bits-tstream/10665/69477/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf
- (2014): «Organización Mundial de la Salud. WHO news release. 7 million premature deaths annually linked to air pollution», Geneva, Switzerland. Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/>
- OPENSTREETMAP (2015): «OpenStreetMap», *OpenStreetMap Foundation (OSMF)*. Disponible en: <https://www.openstreetmap.org/>
- ORTIZ, C.; LINARES, C.; CARMONA, R.; DÍAZ, J. (2017): «Evaluation of short-term mortality attributable to particulate matter pollution in Spain», *Environ. Pol.*, 224: 541-51.
- PEDERSON, J.R.; MASSMAN, W.J.; MAHRT, L.; DELANY, A.; ONCLEY, S.; DEN HARTOG, G.; NEUMANN, H.H.; MICKLE, R.E.; SHAW, R.H.; PAW, K.T.; GRANTZ, D.A.; MACPHERSON, J.I.; DESJARDINS, R.; SCHUEPP, P.H.; PEARSON, R.; ARCADO, T.E. (1995): «California ozone deposition experiment: methods, results, and opportunities», *Atmos. Environ.*, 29 (21): 3115-3132.
- PRANDTL, L. (1925): «Bericht uber Untersuchungen zur ausgebildeten Turbulenz, Zs. Angew», *Math. Mech*, 5: 136-139.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2017): «R: A Language and Environment for Statistical Computing», *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria. Disponible en: <http://www.R-project.org>
- RICARDO-AEA (2014): «Update of the Handbook on External Costs of Transport. Final Report for the European Commission», *DG MOVE Ricardo-AEA/R/ ED57769*, Issue Number 1.
- RWDI (2006): «South Fraser Perimeter Road Regional Air Quality Assessment: Technical Volume 16 of the Environmental Assessment Application», *BC Ministry of Transportation*. Disponible en: www.gov.bc.ca/tran/
- UE (2002): DECISIÓN No 1600/2002/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 22 de julio de 2002 por la que se establece el Sexto Programa de Acción Comunitario en Materia de Medio Ambiente. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, L 242/1. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002D1600&from=ES>
- (2008): DIRECTIVA 2008/50/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 21 de mayo de 2008 relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, L 152/1. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050&from=ES>
- VAILSHERY, L.S.; JAGANMOHAN, M.; NAGENDRA, H. (2013): «Effect of street trees on microclimate and air pollution in a tropical city», *Urban Forestry & Urban Greening*, 12: 408-415.

Climate change and heatwaves in the main coastal cities of the Basque Country

In this paper we analyse the probabilistic behaviour of heatwaves (HWs) in the main coastal cities of the Basque Country (Bayonne, Bilbao and Donostia-San Sebastián) in the twenty-first century. We estimate HW behaviour using data from eight climate circulation models under two representative concentration pathways (RCP 8.5 and RCP 4.5). We model HWs according to three factors: number per annum, duration and intensity, including correlations, and find very different results for each climate model. This highlights the problem of using a single model. Under RCP 8.5, we find an expected mean excess over the 30°C temperature threshold of 4.19°C for Bayonne, 4.05°C for Bilbao and 4.14°C for Donostia-San Sebastián in 2100. These expected values are based on incomplete information, so we also calculate several risk measures.

En este artículo analizamos el comportamiento probabilístico de las olas de calor (HWs) en las capitales costeras del País Vasco (Bayona, Bilbao, Donostia- San Sebastián) en el siglo XXI. Estimamos el comportamiento futuro de las HWs utilizando ocho modelos de circulación climática bajo dos trayectorias de concentración representativas (RCP 8.5, RCP 4.5). Modelizamos las HWs conforme a tres factores: número anual, duración e intensidad, incluyendo correlaciones, encontrando resultados muy diferentes dependiendo de cada modelo climático, constatando la problemática de confiar en un solo modelo. En el escenario más desfavorable, RCP 8.5, obtenemos una temperatura media de exceso sobre el límite de 30°C de 4,19°C en Bayona, 4,05°C en Bilbao y 4.14°C en Donostia-San Sebastián en 2100. Como el valor esperado nos da una información limitada, calculamos adicionalmente varias medidas de riesgo.

XXI. mendean, bero-boladek (HW) Euskal Herriko kostaldeko hiriburuetan (Baiona, Bilbo, Donostia) izan duten portaera probabilistikoa aztertzen dugu artikulu honetan. HWen etorkizuneko portaera aurreikusteko, zortzi zirkulazio klimatiko dituen eredua erabili dugu, bi kontzentrazio-ibilbide adierazgarritan oinarritzen dena (RCP 8.5, RCP 4.5). HWak hiru faktoreen arabera modelizatu ditugu: urteko kopurua, iraupena eta intentsitatea. Korrelazioak ere hartu dira kontuan, eta emaitza oso desberdinak lortu dira klima-eredu bakoitzaren arabera. Beraz, eredu bakar batekin fidatzeak arazoak dakartzala egiaztatu dugu. Kasurik txarrean, RCP 8.5, 30 °C-tik gorako batez besteko tenperatura hauek lortzen ditugu 2100an: 4,19 °C Baionan, 4,05 °C Bilbon eta 4,14 °C Donostian. Aurreikusitako balioak informazio mugatua ematen digunez, hainbat arrisku-neurri ere kalkulatu ditugu.

Table of contents

1. Introduction
2. Materials and methods
3. Results
4. Conclusion

Appendix: The stochastic model

References

Keywords: heatwaves, climate change, stochastic diffusion modelling, representative concentration pathways, uncertainty, risk.

Palabras clave: olas de calor, cambio climático, modelización de procesos de difusión estocásticos, trayectorias de concentración representativas, incertidumbre, riesgo.

JEL codes: Q54, C15, Q51

Entry date: 2019/09/19

Acceptance date: 2020/03/06

1. INTRODUCTION

Heatwaves are one of the main impacts of climate change (CC) (Abadie *et al.*, 2019). Climate change can affect the intensity, number and duration of extreme events (IPCC 2012, 2013). The future occurrences of extreme heat modelled are a function of the RCP scenarios and the geographical factors used.

In this paper, we analyse future HW behaviour in the main coastal cities of the Basque Country (Bayonne, Bilbao and Donostia-San Sebastián). The selection of cities has been motivated by data availability. Additionally, this selection complements with heatwave information a previous study by Sainz de Murieta *et al.* (2018) that assessed sea-level rise in Basque coastal cities.

* This research is supported by the Basque Government through the BERC 2018-2021 programme and by the Spanish Ministry of the Economy and Competitiveness (MINECO) through BC3 María de Maeztu excellence accreditation MDM-2017-0714. Additionally, Luis M. Abadie gratefully acknowledges financial support from The Spanish Ministry of Science and Innovation (RTI2018-093352-B-I00).

** Marek Smid acknowledges the H2020 EU project COACCH – grant agreement N. 776479.

The first step is to define what is meant by «heatwave». One of the main effects of heatwaves is on health. Diaz *et al.* (2015), using epidemiological and climate data, calculated for Spain and at the regional scale, critical temperature values above which there is a significant impact on mortality. These authors define a heatwave as one or more consecutive days exceeding the trigger temperature. The same definition has been used by Diaz *et al.* (2019) and Abadie *et al.* (2019). Note that these critical temperature values calculated by Diaz *et al.* (2015) are regionally different, the values are 30°C for Bizkaia and Gipuzkoa (see Figure 2 of Diaz *et al.*, 2015) and we assume also 30°C for Lapurdi. For example, in Madrid the critical threshold occurs at a temperature of 34°C.

As in Diaz *et al.* (2015), we consider for our study that there is a HW when the maximum daily temperature on one or more consecutive days exceeds 30°C, which we take as the critical temperature. There are other standards criteria about the critical temperature, as that of the Spanish Meteorological Agency (AEMET), but we use a criterion especially adjusted to the region studied.

HWs affect health especially that of risk groups such as elderly people, children and those who work outdoors. In extreme cases, especially within the aforementioned vulnerable groups, exposure to extreme heatwave conditions can lead to premature deaths. Human adaptation is certainly possible but this aspect of future behaviour is very difficult to predict. More severe HWs will trigger increases in the use of air conditioning, affecting peak demand in electrical systems.

The World Health Organization (WHO) and the World Meteorological Organization (WMO, 2015) state that HWs are one of the most dangerous weather events. According to the WMO, HWs are likely to burden health and emergency services, affect physical infrastructures (energy, water, transport), increase demand for water and electricity (possibly resulting in power shortages or even blackouts), negatively affect crops and livestock and thus also impact other sectors such as clothing and food retailing, ecosystem services and tourism.

The impact of HWs is worse in urban areas because of the heat island effect. This is aggravated by the increasing numbers of people who live in urban areas.

This situation may worsen in the future: the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) expects an increase in the frequency, duration and magnitude of HWs over the course of this century (IPCC 2012, 2013).

Christidis *et al.* (2015) investigate how the likelihood of having another extremely hot summer in one of the worst affected parts of Europe has already changed. They find that events which in the early 2000's were expected to occur twice a century are now considered to have significantly shorter return periods and occur on average twice per decade.

Abadie *et al.* (2019) analyse the expected future mortality caused by the impact of CC in HWs in two Spanish cities (Madrid and Bilbao), using a single climate

model with two RCP scenarios. Their paper calculates measures of risk such as the 95% percentile and the mean of the average of the 5% of worst cases.

Lo *et al.* (2019) analyse future heat-related mortality induced by CC in 12 U.S. cities. They show that increasingly ambitious mitigation to meet the temperature goals set in the Paris Agreement can prevent substantial heat-related mortality in the cities in question. They calculate that ratcheting up mitigation ambition to meet the 2°C threshold target could prevent between 70 and 1980 heat-related deaths per city per annum during extreme events.

Díaz *et al.* (2019) analyse the mortality impact of high temperatures for 2021-2050 and 2051-2100 under RCP8.5 with and without adaptation. They conclude that in the no adaptation case overall annual mortality attributable to high temperatures in Spain could total 1414 deaths/year in the first period and as many as 12,896 deaths/year in the second.

Mitchell *et al.* (2016) quantify the role of human activity in climate and heat-related mortality by analysing the Europe-wide response to the high temperatures in 2003 (which caused up to seventy thousand excess deaths in Europe) and the localised responses in London and Paris.

Muller *et al.* (2016) find that the probability of extremely hot summers is now about ten times greater in many regions of the world than it would have been in the absence of past greenhouse gas increases due to CC.

The main contribution of this work are, first, the application of the model defined by Abadie *et al.* (2019) to the main Basque coastal cities; second, and more importantly, the analysis of results when different climate models are used, which highlights the problem of relying on results from a single model.

The rest of the paper is organised as follows. Section 2 is dedicated to material and methods, and includes a description of the data used in the paper and of the stochastic model deployed. Section 3 presents our findings and Section 4 sets out conclusions.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. The data

To investigate the impacts of extreme temperatures in the three Basque coastal cities targeted (Bayonne, Bilbao and San Sebastián) we used the recommended multi-model ensemble approach since the ensemble outperforms individual projections and provides a more reliable picture of future changes (Sillmann *et al.*, 2013b). A multi-dynamic Regional Climate Model (RCM) downscaling of individual Global Circulation Models (GCMs) is also desirable (Smid and Costa, 2017). The European branch of the CORDEX experiment currently provides the largest collection of sim-

ulations, with data at two different resolutions: 0.11° and 0.44°. These simulations have been assessed by many researchers. Projected climate variables were compared with observed values (e.g. Abiodun, *et al.*, 2017; Hofstra *et al.*, 2009; Soares and Cardoso, 2018) and indices based on simulations of daily minimum and maximum temperature CORDEX data were extensively validated against their counterparts computed on an observational dataset (Lelieveld *et al.*, 2016; Pereira, *et al.*, 2017). These validation exercises are usually performed using the Ensemble-OBS gridded observational dataset as per Haylock *et al.*, (2008). Some studies specifically assess the ability of models to project HWs (e.g. Ouzeau *et al.*, (2016), Vautard *et al.*, (2013); or Lhotka *et al.*, (2018)) and the literature in general confirms the reliability of EURO-CORDEX data (e.g. Kotlarski *et al.*, (2014)).

EURO-CORDEX models exhibit common biases in underestimating heat extremes in Scandinavia, and the contrary for Southern and Central Europe. They also show large-scale cooling over vast continental areas in simulations at increased resolution. Detailed analyses of biases can be found in Vautard *et al.* (2013). Despite these systematic biases, simulated values of temperature variables have been found to be especially reliable.

Of the two available EURO-CORDEX resolutions, we chose the finer grid projections (~ 12.5 km). Coarser simulations have been shown to project drier summer conditions (Kotlarski *et al.*, 2014) and very persistent HWs (Vautard *et al.*, 2013). These issues are improved in the higher resolution (Kotlarski *et al.*, 2014; Lhotka *et al.*, 2018): the main advantages of finer-scale projections are found in the warm season (Soares and Cardoso, 2018; Lhotka *et al.*, 2018). These improvements can be attributed to enhanced orography data and better-resolved local feedbacks, which are pronounced in some coastal regions due to more accurate representation of coastline and coastal breezes (Vautard *et al.*, 2013). The same goes for areas of complex terrain (Lhotka *et al.*, 2018). Both these factors are relevant in the context of our target cities on the coast of the Basque Country, an orographically complex region.

We excluded some models from the full EURO-CORDEX ensemble due to shortcomings in the Mediterranean area (Kotlarski *et al.*, 2014) and in their ability to estimate the intensity of extreme events (Vautard *et al.*, 2013). The resulting subset used in this work comprises 8 simulations containing different GCM/RCM combinations drawn up by seven different institutions (Table 1). The daily maximum near-surface temperature data for 1971-2100 are taken from the ESG (Earth System Grid) data repository and details on models can be found on the EURO-CORDEX website (<http://www.euro-cordex.net>).

Out of all the Representative Concentration Pathway (RCP) scenarios adopted by the IPCC for its 5th Assessment Report (Christensen *et al.*, 2013), we use RCP4.5 and RCP8.5 here. Unlike the SRES (Special Report on Emission Scenarios) (Nakicenovic *et al.*, 2000) scenarios, they are not associated with particular storylines and

thus account for the combined uncertain influence of economic, technological, demographical and policy factors (Sillmann *et al.*, 2013b).

Table 1. LIST OF GCM/RCM COMBINATIONS USED

Organisation	RCM	Driving GCM
Climate Limited-area Modelling community (CLMcom)	CCLM4-8-17	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5
Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)	RCA4	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5
Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI)	RACMO22E	ICHEC-EC-EARTH
Danish Meteorological Institute (DMI)	HIRHAM5	ICHEC-EC-EARTH
Institut Pierre Simon Laplace (IPSL-INERIS)	WRF331F	IPSL-IPSL-CM5A-MR
Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)	RCA4	IPSL-IPSL-CM5A-MR
Climate Limited-area Modelling community (CLMcom)	CCLM4-8-17	MPI-M-MPI-ESM-LR
Max Planck Institute - CSC group (MPI - CSC)	REMO2009	MPI-M-MPI-ESM-LR

Source: <http://www.euro-cordex.net> <http://www.euro-cordex.net>

The RCP4.5 scenario was designed at the Pacific Northwest National Laboratory's Joint Change Research Institute (JGCRI) by the GCAM modelling team. It describes a future with stabilisation in which total relative forcing reaches a steady balance soon after 2100 with no overshooting of the long-term target (Smith and Wigley, 2006). RCP4.5 represents category IV from the AR4, which contains the vast majority of the scenarios assessed in that report (van Vuuren, 2011). This illustrates the importance of RCP4.5 as a plausible future scenario.

RCP8.5 assumes continued growth in energy demand and hence does not have any peak breaking point in the 21st century. This scenario assumes continuing trends in all anthropogenic activities influencing the climate, with no mitigation policies being implemented (Riahi *et al.*, 2011). We chose this scenario here because it might be more relevant in projected future heat impacts on cities given the additional influence of urbanisation on local climates. Many previous studies have found that the most severe impacts throughout the 21st century are projected under the RCP8.5 scenario (e.g. Jacob *et al.*, 2014; Lhotka *et al.*, 2018; Russo *et al.*, 2015). However, a noteworthy recent finding by Lhotka *et al.* (2018) for the near future (2020-2049) in Central Europe shows the largest increment in HW frequency in the RCP4.5 «low concentration» scenario.

Table 2. RCP 4.5 MAXIMUM DAILY TEMPERATURE STATISTICS (2006-2100)

Bayonne	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8
Maximum temperature °C	44.11	43.43	41.48	38.05	35.06	48.13	46.32	44.38
99% percentile °C	35.65	35.54	32.15	31.09	30.02	39.37	36.14	35.47
95% percentile °C	31.83	31.31	29.14	28.65	27.31	36.00	31.86	32.32
>30 °C (number of days)	2,324	1,969	1,013	685	352	5,564	2,334	2,844
Mean temperature °C	16.56	17.21	17.11	16.71	16.23	19.55	17.17	18.49
Bilbao	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8
Maximum temperature °C	45.04	39.75	39.44	35.83	35.09	42.38	43.63	48.18
99% percentile °C	35.92	34.20	31.20	29.88	29.62	37.38	35.76	36.94
95% percentile °C	32.20	31.14	28.49	27.72	27.05	34.77	31.89	33.74
>30 °C (number of days)	2,504	2,069	682	311	282	5,480	2,378	4,199
Mean temperature °C	16.48	17.08	16.90	16.48	15.21	19.28	16.98	19.89
Donostia-San Sebastián	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8
Maximum temperature °C	43.62	43.16	41.50	36.89	35.20	46.21	44.66	44.10
99% percentile °C	35.33	35.29	31.92	30.39	29.80	39.18	35.57	35.53
95% percentile °C	31.54	31.12	28.90	28.23	27.10	35.92	31.54	31.96
>30 °C (number of days)	2,178	1,936	912	483	303	5,525	2,164	2,635
Mean temperature °C	16.28	16.95	16.66	16.41	15.92	19.32	16.88	18.29

Source: Calculated by the authors.

In short, we use eight different GCM/RCM simulation runs under one medium stabilisation scenario (RCP4.5) and one very high emission baseline scenario (RCP8.5), thus meeting the requirement of having a multi-model and multi-scenario set up for our future climate impact experiment.

We obtain near-surface daily maximum temperatures for each central grid cell in each of our target cities. Thus 34,675 simulated values are used for each city, RCP and model. Tables 2 and 3 show some basic statistics of these time series.

Table 3. RCP 8.5 MAXIMUM DAILY TEMPERATURE STATISTICS (2006-2100)

Bayonne	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8
Maximum temperature °C	46.15	47.61	43.48	41.81	37.38	48.45	49.36	47.31
99% percentile °C	36.88	36.71	34.57	32.53	30.57	41.80	38.92	37.78
95% percentile °C	32.66	31.99	31.11	29.65	27.73	38.06	34.21	33.96
>30 °C (number of days)	2,652	2,269	1,926	1,233	477	6,654	3,421	3,882
mean temperature °C	17.26	17.87	17.95	17.42	16.82	20.52	18.16	19.37
Bilbao	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8
Maximum temperature °C	45.20	44.54	40.48	37.49	38.56	45.92	46.60	47.05
99% percentile °C	36.98	35.21	33.34	31.06	30.49	40.00	37.87	39.16
95% percentile °C	32.85	31.90	30.46	28.76	27.54	36.82	33.78	35.57
>30 °C (number of days)	2,838	2,534	1,678	747	446	6,479	3,394	5,381
Mean temperature °C	17.15	17.71	17.74	17.19	15.83	20.20	17.93	20.84
Donostia - San Sebastian	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8
Maximum temperature °C	46.12	47.82	44.14	42.19	37.21	48.12	48.69	53.34
99% percentile °C	36.45	36.45	34.47	31.90	30.34	41.59	38.29	37.66
95% percentile °C	32.34	31.86	30.97	29.23	27.51	37.96	33.77	33.68
>30 °C (number of days)	2,515	2,230	1,848	985	427	6,570	3,207	3,608
Mean temperature °C	16.96	17.60	17.52	17.12	16.52	20.29	17.84	19.17

Source: Calculated by the authors.

As in Diaz *et al.* (2015), we assume that there is a HW when the maximum daily temperature on one or more consecutive days exceeds 30°C in Bizkaia and Gipuzkoa, which we take as the critical temperature. We assume 30°C for Lapurdi as well. We apply this criterion to every day of the year, without discriminating by months.

2.2 The stochastic model

We consider three HW characteristics: a) the number of HWs in a given year; b) their duration in days; and c) their intensity measured by their exceedance of the

critical temperature of 30°C. We also consider two correlations: a) between the number of HWs per year and their durations; and b) between the duration of HWs and their temperature exceedances.

We use the Abadie *et al.* (2019) model with all series data, not only for the summer period. See Abadie *et al.* (2019) for a complete and detailed description of the model. However, a brief description of this model is provided in Appendix A.

The model parameters are shown in Table 4.

Table 4. **MODEL PARAMETERS**

Parameter	Units	Description
$\lambda(t)$	(-)	Number of HWs in year t
α	(y ⁻¹)	Exponential parameter of $\lambda(0)$
$d(t)$	(days)	HW duration
γ	(y ⁻¹)	Exponential parameter of $d(0)$
$g(t)$	(°C)	Temperature exceedance above 30°C
β	(y ⁻¹)	Exponential parameter of $g(0)$
σ	(°C)	Volatility of temperature exceedance
$\rho_{1,2}$	(-)	Correlation of duration and temperature exceedance
$\rho_{2,3}$	(-)	Correlation of number of HWs and duration
σ_d	(°C)	Volatility of duration

Source: Abadie *et al.* (2019).

The models are calibrated using nonlinear least squares.

3. RESULTS

3.1 Expected results

We use the following codes to represent cities, the model and the scenario: CCMSS.

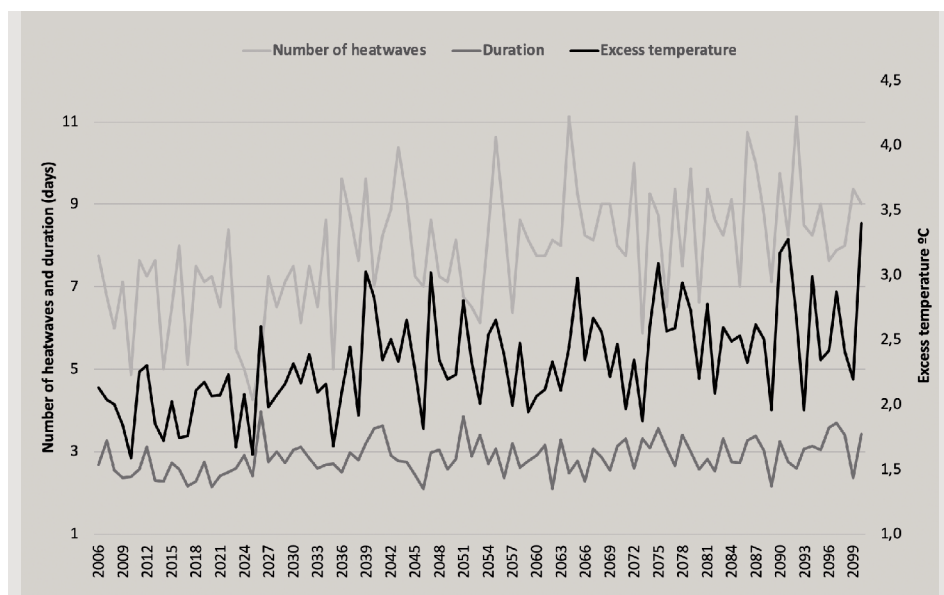
Where CC stands for the city (BA for Bayonne, BI for Bilbao and SA for Donostia–San Sebastián), M is the model $M \in \{1, 2, \dots, 8\}$ and SS is the scenario ($SS \in \{45, 85\}$ for RCP 4.5 and RCP 8.5 respectively).

Tables 5 and 6 show the parameter values and results for Bayonne under RCP 4.5 and RCP 8.5. The different results for each model are clearly visible: the mean shows that under the RCP 4.5 scenario the mean estimation of HW occurrence for Bayonne increases overtime to 9.26 HWs in 2100. Duration also increases to a mean of 2.76 days in 2100 and a mean exceedance of 2.79°C of the critical temperature of 30°C in that year.

Table 5 also includes information about distribution (volatilities and correlation) that can be used to build distributions of HW components. These can be used to generate Monte Carlo distributions and calculate expected values and risk measures such as Value-at-Risk and Expected Shortfall.

Figure 1 shows the trend in the number of HWs, their duration and their temperature exceedance using the mean of the eight models under the RCP 4.5 scenario. This Figure confirms a growing trend in all three variables.

Figure 1. **MEAN NUMBER OF HWS, DURATION AND TEMPERATURE EXCEEDANCE IN BAYONNE UNDER THE RCP 4.5 SCENARIO**



Source: Calculated by the authors.

RCP 8.5 shows a mean in 2100 of 14.55 HWs with a duration of 4.19 days and a mean exceedance of 4.11°C over the 30°C critical temperature. These values are higher than those obtained with RCP 4.5.

Figure 2 shows the trend in the number of HWs, their duration and their temperature exceedance using the mean of the eight models under the RCP 8.5 scenario. The HW behaviour shown here is much more disturbing than in the RCP 4.5 scenario. The figure confirms the upward trends shown in Table 6.

Table 5. BAYONNE HWS RCP 4.5

Parameters		BA1E45	BA2E45	BA3E45	BA4E45	BA5E45	BA6E45	BA7E45	BA8E45	Mean
$\lambda(0)$		8.5471	6.4043	4.3676	3.2114	1.7824	10.9392	7.7006	10.2925	6.6556
α		0.0015	0.0028	0.0044	0.0059	0.0022	0.0030	0.0055	0.0029	0.0035
$d(0)$		2.3092	2.7644	1.6931	1.3493	1.4014	4.2530	1.8655	2.1443	2.2225
γ		0.0026	-0.0008	0.0012	0.0030	0.0015	0.0026	0.0049	0.0034	0.0023
$g(0)$		2.2681	2.5409	1.4091	1.2152	0.4822	3.3627	2.4908	2.2145	1.9979
β		0.0044	0.0005	0.0015	0.0008	0.0105	0.0034	0.0037	0.0037	0.0036
σ		0.9418	1.2066	0.7967	0.6421	0.6720	0.7465	0.8863	0.7478	0.8300
$\rho_{1,2}$		0.1479	0.2680	0.3930	0.2960	0.3670	-0.3529	0.1734	0.0313	0.1655
$\rho_{2,3}$		0.4860	0.7038	0.6092	0.5286	0.5549	0.5792	0.4659	0.4685	0.5495
σ_d		0.8872	1.3427	0.7394	0.7087	1.2764	1.7789	0.8111	0.7609	1.0382
Expected Values		BA1E45	BA2E45	BA3E45	BA4E45	BA5E45	BA6E45	BA7E45	BA8E45	Mean
$\lambda(t)$	2025	8.79	6.75	4.75	3.59	1.86	11.57	8.55	10.88	7.12
$\lambda(t)$	2050	9.13	7.24	5.30	4.15	1.96	12.47	9.81	11.70	7.77
$\lambda(t)$	2075	9.48	7.77	5.92	4.81	2.07	13.43	11.26	12.59	8.48
$\lambda(t)$	2100	9.84	8.33	6.61	5.57	2.19	14.47	12.92	13.54	9.26
$d(t)$	2025	2.43	2.72	1.73	1.43	1.44	4.47	2.05	2.29	2.32
$d(t)$	2050	2.59	2.66	1.79	1.54	1.50	4.78	2.32	2.48	2.46
$d(t)$	2075	2.76	2.61	1.84	1.66	1.55	5.10	2.62	2.70	2.60
$d(t)$	2100	2.94	2.56	1.90	1.79	1.61	5.45	2.97	2.94	2.76
$g(t)$	2025	2.47	2.57	1.45	1.23	0.59	3.58	2.67	2.37	2.14
$g(t)$	2050	2.76	2.60	1.51	1.26	0.77	3.90	2.93	2.60	2.34
$g(t)$	2075	3.08	2.63	1.56	1.28	1.00	4.24	3.21	2.86	2.55
$g(t)$	2100	3.44	2.67	1.62	1.31	1.30	4.61	3.51	3.13	2.79

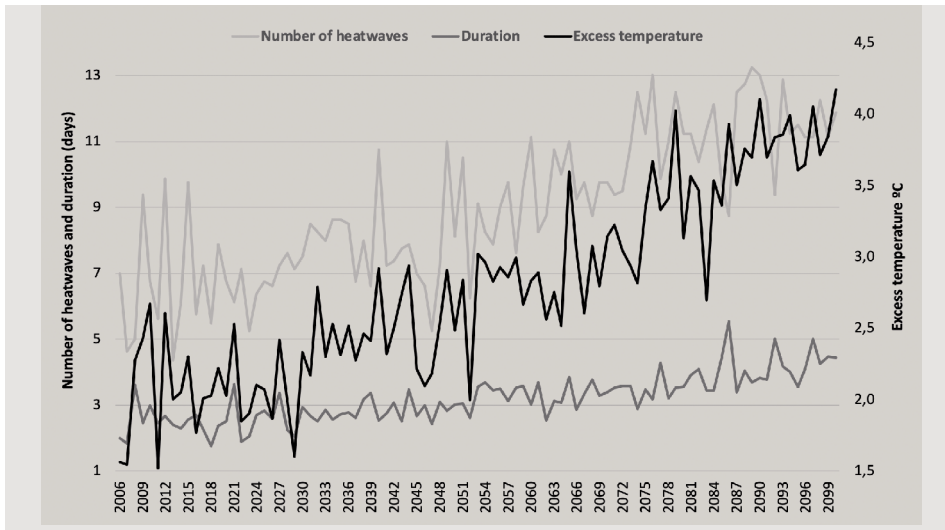
Source: Calculated by the authors.

Table 6. BAYONNE HWS RCP 8.5

Parameters		BA1E85	BA2E85	BA3E85	BA4E85	BA5E85	BA6E85	BA7E85	BA8E85	Mean
$\lambda(0)$		6.4921	6.3612	4.2294	2.6160	1.1135	11.6384	7.8557	10.4441	6.3438
α		0.0072	0.0052	0.0117	0.0166	0.0150	0.0013	0.0079	0.0059	0.0088
$d(0)$		2.2616	1.7339	1.6148	1.1968	1.0535	3.4559	1.9187	1.9577	1.8991
γ		0.0055	0.0095	0.0083	0.0080	0.0083	0.0108	0.0088	0.0080	0.0084
$g(0)$		2.3285	1.7160	1.4980	0.9678	0.5911	3.2610	2.4927	2.1348	1.8737
β		0.0065	0.0100	0.0079	0.0084	0.0112	0.0075	0.0077	0.0078	0.0083
σ		0.8413	1.2186	0.8471	0.7376	0.7067	0.9095	0.9327	0.7697	0.8704
$\rho_{1,2}$		0.1093	0.1415	0.3599	0.5933	0.4547	-0.4117	0.2122	0.0293	0.1860
$\rho_{2,3}$		0.5136	0.6131	0.5210	0.4541	0.5477	0.5691	0.5674	0.5666	0.5441
σ_d		0.8571	1.3597	0.8357	0.6554	1.0765	2.2805	1.1155	1.0830	1.1579
Expected Values		BA1E85	BA2E85	BA3E85	BA4E85	BA5E85	BA6E85	BA7E85	BA8E85	Mean
$\lambda(t)$	2025	7.44	7.02	5.28	3.58	1.48	11.93	9.13	11.68	7.50
$\lambda(t)$	2050	8.91	7.98	7.07	5.43	2.15	12.32	11.12	13.53	9.36
$\lambda(t)$	2075	10.67	9.08	9.46	8.21	3.13	12.73	13.55	15.68	11.67
$\lambda(t)$	2100	12.77	10.32	12.67	12.43	4.55	13.15	16.52	18.17	14.55
$d(t)$	2025	2.51	2.08	1.89	1.39	1.23	4.24	2.27	2.28	2.23
$d(t)$	2050	2.89	2.64	2.33	1.70	1.52	5.55	2.83	2.78	2.75
$d(t)$	2075	3.32	3.35	2.87	2.08	1.87	7.26	3.53	3.39	3.39
$d(t)$	2100	3.81	4.25	3.54	2.55	2.30	9.50	4.39	4.13	4.19
$g(t)$	2025	2.63	2.07	1.74	1.13	0.73	3.76	2.88	2.47	2.20
$g(t)$	2050	3.10	2.66	2.12	1.40	0.97	4.53	3.50	3.00	2.71
$g(t)$	2075	3.65	3.41	2.58	1.72	1.28	5.46	4.24	3.65	3.33
$g(t)$	2100	4.29	4.38	3.14	2.12	1.69	6.58	5.13	4.43	4.11

Source: Calculated by the authors.

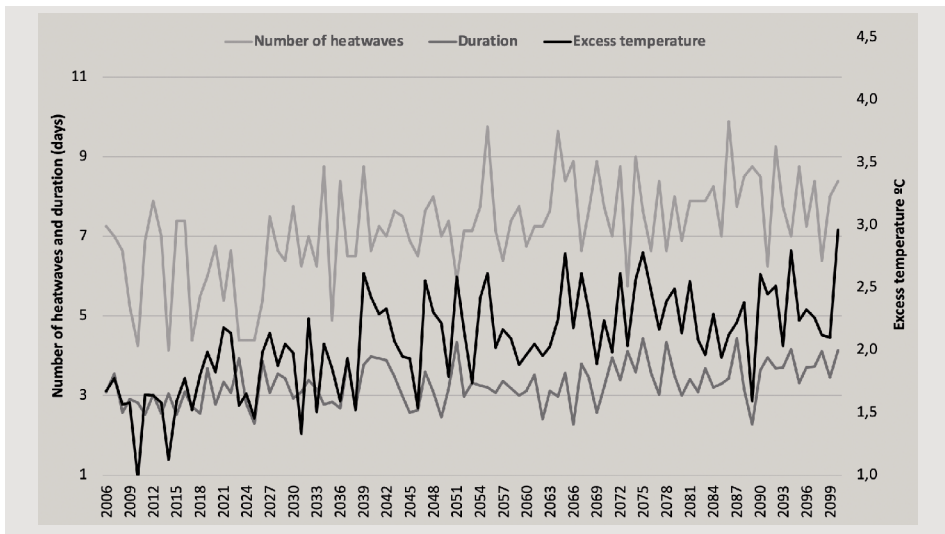
Figure 2. MEAN NUMBER OF HWS, DURATION AND TEMPERATURE EXCEEDANCE IN BAYONNE UNDER THE RCP 8.5 SCENARIO



Source: Calculated by the authors.

Tables 7 and 8 show the results for Bilbao and Tables 9 and 10 those for Donostia-San Sebastián.

Figure 3. MEAN NUMBER OF HWS, DURATION AND TEMPERATURE EXCEEDANCE IN BILBAO UNDER THE RCP 4.5 SCENARIO



Source: Calculated by the authors.

Table 7: **BILBAO HWS RCP 4.5**

Parameters		BI1E45	BI2E45	BI3E45	BI4E45	BI5E45	BI6E45	BI7E45	BI8E45	Mean
$\lambda(0)$		7.7027	5.7167	2.4776	1.3464	1.4734	9.7975	7.3289	13.4202	6.1579
α		0.0028	0.0047	0.0062	0.0091	0.0029	0.0017	0.0050	0.0013	0.0042
$d(0)$		2.6061	3.1761	1.4266	0.8216	1.0593	5.0037	2.1181	2.5594	2.3464
γ		0.0027	-0.0011	0.0040	0.0065	0.0042	0.0038	0.0046	0.0040	0.0036
$g(0)$		2.4318	1.7246	0.8639	0.6528	0.4894	2.6621	2.2793	2.4959	1.7000
β		0.0036	0.0031	0.0043	0.0052	0.0070	0.0041	0.0042	0.0036	0.0044
σ		0.8620	0.8932	0.7480	0.7430	0.6120	0.8018	0.8458	0.7406	0.7808
$\rho_{1,2}$		0.0654	0.0033	0.3769	0.5903	0.4203	-0.6074	0.0806	-0.0469	0.1103
$\rho_{2,3}$		0.5729	0.7286	0.7197	0.5961	0.5920	0.5956	0.5151	0.7087	0.6286
σ_d		1.0657	1.8677	1.2663	0.7304	1.1965	3.0738	0.9211	0.8703	1.3740
Expected Values		BI1E45	BI2E45	BI3E45	BI4E45	BI5E45	BI6E45	BI7E45	BI8E45	Mean
$\lambda(t)$	2025	8.13	6.25	2.79	1.60	1.56	10.11	8.06	13.76	6.67
$\lambda(t)$	2050	8.72	7.04	3.26	2.01	1.68	10.54	9.13	14.23	7.41
$\lambda(t)$	2075	9.36	7.92	3.80	2.53	1.80	10.98	10.34	14.71	8.24
$\lambda(t)$	2100	10.04	8.92	4.44	3.17	1.94	11.45	11.71	15.21	9.16
$d(t)$	2025	2.74	3.11	1.54	0.93	1.15	5.37	2.31	2.76	2.51
$d(t)$	2050	2.93	3.03	1.70	1.09	1.27	5.90	2.59	3.05	2.75
$d(t)$	2075	3.13	2.95	1.88	1.29	1.41	6.48	2.90	3.36	3.00
$d(t)$	2100	3.35	2.87	2.08	1.51	1.57	7.12	3.25	3.71	3.28
$g(t)$	2025	2.60	1.83	0.94	0.72	0.56	2.88	2.47	2.67	1.85
$g(t)$	2050	2.85	1.98	1.04	0.82	0.67	3.18	2.74	2.92	2.06
$g(t)$	2075	3.12	2.14	1.16	0.94	0.80	3.52	3.05	3.19	2.30
$g(t)$	2100	3.41	2.32	1.29	1.07	0.95	3.90	3.39	3.49	2.57

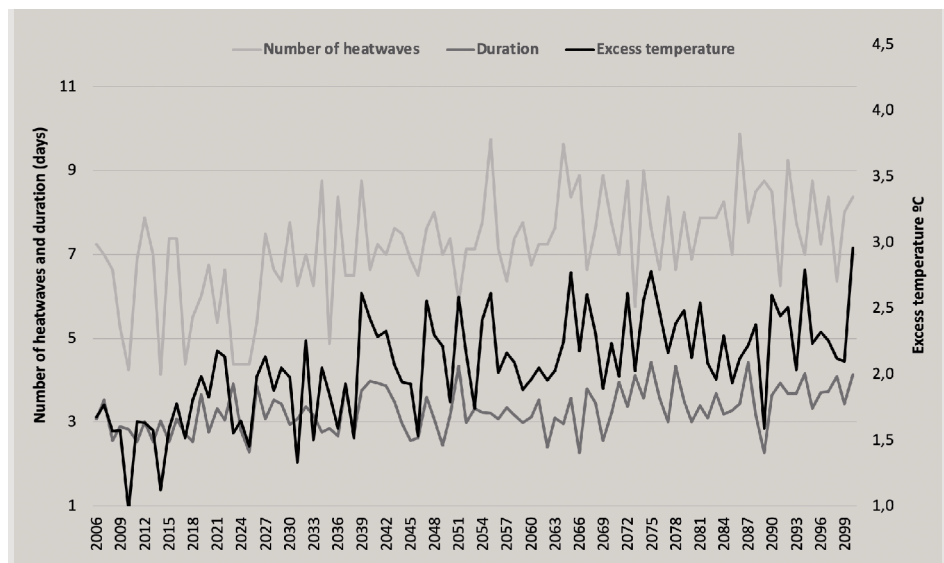
Source: Calculated by the authors.

Table 8. **BILBAO HWS RCP 8.5**

Parameters		BI1E85	BI2E85	BI3E85	BI4E85	BI5E85	BI6E85	BI7E85	BI8E85	Mean
$\lambda(0)$		6.3305	5.3640	2.4599	1.0549	0.9195	10.5684	7.3337	13.3422	5.9216
α		0.0067	0.0081	0.0167	0.0240	0.0173	0.0004	0.0072	0.0025	0.0104
$d(0)$		2.6448	2.2724	1.4745	0.7909	0.9007	3.8161	1.9980	2.5175	2.0519
γ		0.0050	0.0075	0.0110	0.0124	0.0103	0.0115	0.0102	0.0086	0.0095
$g(0)$		2.3666	1.4471	0.8299	0.5302	0.4161	2.4552	2.3269	2.3200	1.5865
β		0.0062	0.0092	0.0120	0.0105	0.0163	0.0097	0.0074	0.0086	0.0100
σ		0.8618	0.7596	0.6691	0.5890	0.6984	0.8858	0.8153	0.8343	0.7641
$\rho_{1,2}$		0.0266	0.0102	0.3992	0.5300	0.4668	-0.5468	0.0513	-0.2672	0.0838
$\rho_{2,3}$		0.5336	0.6440	0.5478	0.5870	0.5859	0.6197	0.6431	0.6683	0.6037
σ_d		1.0588	1.6791	1.2326	0.9257	1.1272	2.8158	1.4373	1.3929	1.4587
Expected Values		BI1E45	BI2E45	BI3E45	BI4E45	BI5E45	BI6E45	BI7E45	BI8E45	Mean
$\lambda(t)$	2025	7.19	6.26	3.38	1.66	1.28	10.64	8.42	14.00	7.21
$\lambda(t)$	2050	8.51	7.67	5.13	3.03	1.97	10.75	10.09	14.91	9.35
$\lambda(t)$	2075	10.07	9.39	7.79	5.52	3.04	10.85	12.09	15.89	12.11
$\lambda(t)$	2100	11.91	11.50	11.83	10.05	4.68	10.95	14.49	16.92	15.70
$d(t)$	2025	2.91	2.62	1.82	1.00	1.09	4.75	2.43	2.96	2.46
$d(t)$	2050	3.29	3.16	2.39	1.36	1.41	6.33	3.14	3.67	3.12
$d(t)$	2075	3.73	3.81	3.14	1.86	1.83	8.43	4.05	4.55	3.96
$d(t)$	2100	4.22	4.59	4.13	2.53	2.36	11.24	5.24	5.63	5.03
$g(t)$	2025	2.66	1.72	1.04	0.65	0.57	2.95	2.68	2.73	1.92
$g(t)$	2050	3.11	2.17	1.41	0.84	0.85	3.76	3.23	3.38	2.46
$g(t)$	2075	3.63	2.73	1.90	1.09	1.28	4.79	3.89	4.19	3.16
$g(t)$	2100	4.24	3.43	2.56	1.42	1.93	6.10	4.68	5.20	4.05

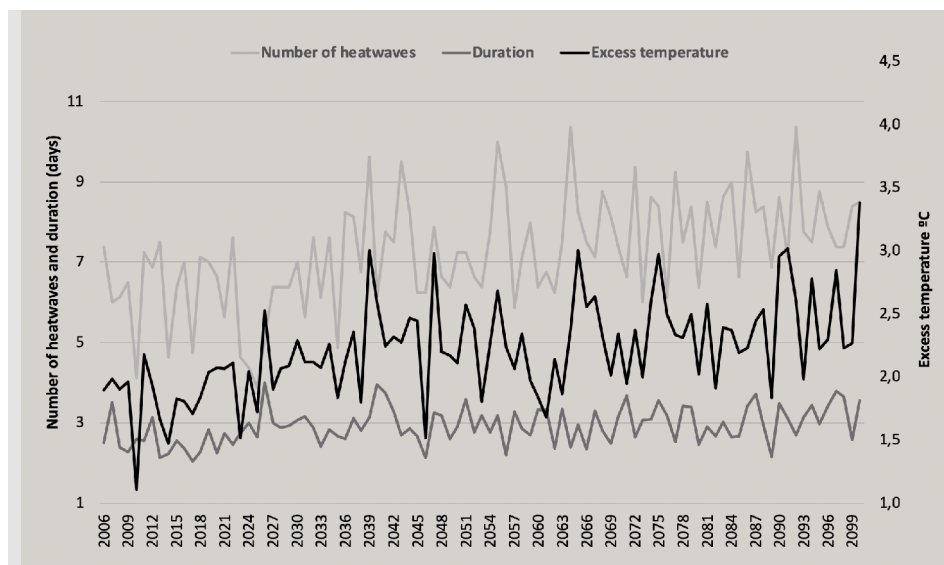
Source: Calculated by the authors.

Figure 4. MEAN NUMBER OF HWS, DURATION AND TEMPERATURE EXCEEDANCE IN BILBAO UNDER THE RCP 8.5 SCENARIO



Source: Calculated by the authors.

Figure 5. MEAN NUMBER OF HWS, DURATION AND TEMPERATURE EXCEEDANCE IN DONOSTIA-SAN SEBASTIÁN UNDER THE RCP 4.5 SCENARIO



Source: Calculated by the authors.

Table 9. DONOSTIA-SAN SEBASTIÁN HWS RCP 4.5

Parameters		SA1E45	SA2E45	SA3E45	SA4E45	SA5E45	SA6E45	SA7E45	SA8E45	Mean
$\lambda(0)$		7.9673	5.9170	3.7493	2.2182	1.6064	11.4845	6.9468	9.3017	6.1489
α		0.0020	0.0033	0.0040	0.0072	0.0025	0.0013	0.0057	0.0042	0.0038
$d(0)$		2.2083	2.8949	1.6537	1.2751	1.2166	4.1951	1.8453	2.1967	2.1857
γ		0.0030	-0.0011	0.0018	0.0023	0.0020	0.0039	0.0054	0.0021	0.0024
$g(0)$		2.2835	2.3567	1.3083	0.8673	0.5119	3.3160	2.3153	2.2388	1.8997
β		0.0036	0.0008	0.0026	0.0023	0.0086	0.0034	0.0039	0.0032	0.0036
σ		0.9155	1.1682	0.8883	0.6228	0.6743	0.7372	0.8838	0.7780	0.8335
$\rho_{1,2}$		0.1773	0.2430	0.4565	0.3239	0.4806	-0.4797	0.2078	-0.0109	0.1748
$\rho_{2,3}$		0.5032	0.7360	0.7114	0.4135	0.5714	0.5159	0.4383	0.4816	0.5464
σ_d		0.8440	1.5830	0.9739	0.7833	1.0473	2.2158	0.8302	0.7802	1.1322
Expected Values		SA1E45	SA2E45	SA3E45	SA4E45	SA5E45	SA6E45	SA7E45	SA8E45	Mean
$\lambda(t)$	2025	8.28	6.30	4.04	2.55	1.68	11.76	7.74	10.08	6.61
$\lambda(t)$	2050	8.70	6.83	4.47	3.05	1.79	12.14	8.92	11.19	7.26
$\lambda(t)$	2075	9.15	7.41	4.94	3.65	1.91	12.52	10.28	12.44	7.97
$\lambda(t)$	2100	9.62	8.04	5.46	4.38	2.03	12.92	11.85	13.82	8.76
$d(t)$	2025	2.34	2.83	1.71	1.33	1.26	4.52	2.04	2.29	2.29
$d(t)$	2050	2.52	2.75	1.79	1.41	1.33	4.98	2.34	2.41	2.43
$d(t)$	2075	2.72	2.68	1.87	1.49	1.40	5.50	2.67	2.55	2.58
$d(t)$	2100	2.93	2.60	1.95	1.58	1.47	6.06	3.06	2.69	2.74
$g(t)$	2025	2.45	2.39	1.37	0.91	0.60	3.54	2.49	2.38	2.03
$g(t)$	2050	2.68	2.44	1.47	0.96	0.75	3.85	2.75	2.58	2.22
$g(t)$	2075	2.93	2.49	1.56	1.01	0.93	4.19	3.03	2.80	2.43
$g(t)$	2100	3.20	2.54	1.67	1.07	1.15	4.57	3.34	3.03	2.65

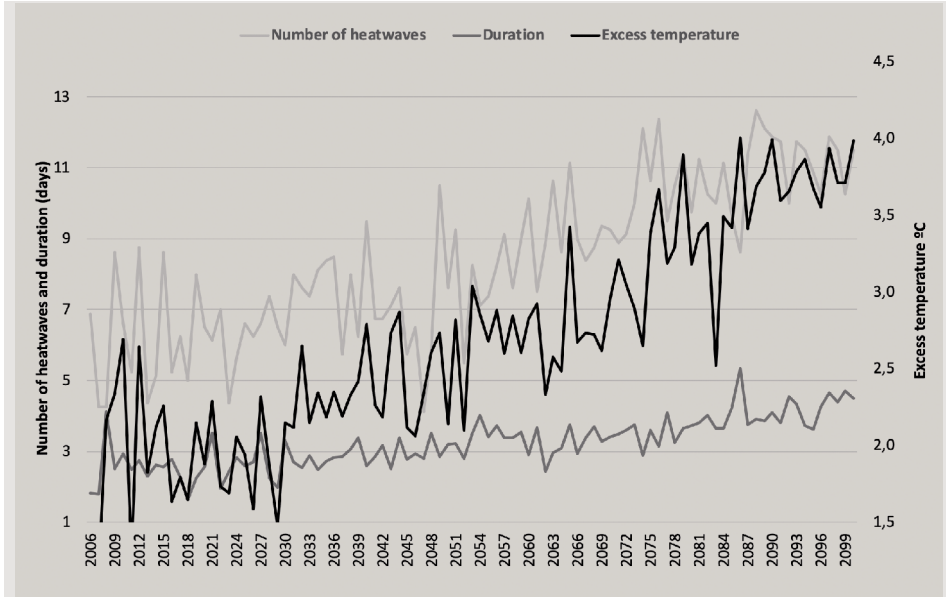
Source: Calculated by the authors.

Table 10. DONOSTIA-SAN SEBASTIÁN HWS RCP 8.5

Parameters		SA1E85	SA2E85	SA3E85	SA4E85	SA5E85	SA6E85	SA7E85	SA8E85	Mean
$\lambda(0)$		5.8548	5.8098	3.7688	1.6352	0.9873	11.2263	7.1728	9.9195	5.7968
α		0.0081	0.0057	0.0122	0.0207	0.0159	0.0012	0.0084	0.0065	0.0098
$d(0)$		2.4024	1.8435	1.6162	0.9213	1.0283	3.4393	1.9061	1.8682	1.8782
γ		0.0047	0.0094	0.0089	0.0112	0.0078	0.0116	0.0088	0.0075	0.0087
$g(0)$		2.1170	1.5396	1.4425	0.7473	0.5063	3.2203	2.3247	2.0650	1.7453
β		0.0074	0.0113	0.0083	0.0100	0.0128	0.0076	0.0081	0.0080	0.0092
σ		0.8207	1.1962	0.9319	0.7511	0.7247	0.9522	0.8963	0.7898	0.8829
$\rho_{1,2}$		-0.0268	0.1158	0.3918	0.6297	0.4324	-0.4571	0.2632	0.1602	0.1887
$\rho_{2,3}$		0.4035	0.5510	0.5113	0.5196	0.5160	0.5287	0.5787	0.6039	0.5266
σ_d		1.0364	1.5040	1.0007	0.7196	1.0650	2.4695	1.0931	0.8884	1.2221
Expected Values		SA1E45	SA2E45	SA3E45	SA4E45	SA5E45	SA6E45	SA7E45	SA8E45	Mean
$\lambda(t)$	2025	6.83	6.47	4.75	2.42	1.34	11.49	8.41	11.23	6.99
$\lambda(t)$	2050	8.37	7.46	6.43	4.06	1.99	11.85	10.38	13.22	8.94
$\lambda(t)$	2075	10.25	8.60	8.72	6.80	2.96	12.21	12.81	15.57	11.43
$\lambda(t)$	2100	12.56	9.91	11.81	11.40	4.41	12.59	15.80	18.33	14.61
$d(t)$	2025	2.63	2.20	1.91	1.14	1.19	4.29	2.25	2.15	2.22
$d(t)$	2050	2.96	2.78	2.39	1.51	1.45	5.73	2.80	2.60	2.76
$d(t)$	2075	3.32	3.52	2.98	2.00	1.77	7.65	3.49	3.14	3.43
$d(t)$	2100	3.74	4.45	3.73	2.64	2.15	10.22	4.34	3.78	4.27
$g(t)$	2025	2.44	1.91	1.69	0.90	0.65	3.72	2.71	2.41	2.08
$g(t)$	2050	2.94	2.53	2.08	1.16	0.89	4.50	3.32	2.94	2.62
$g(t)$	2075	3.53	3.36	2.56	1.49	1.23	5.43	4.06	3.59	3.29
$g(t)$	2100	4.25	4.47	3.14	1.91	1.69	6.57	4.97	4.39	4.14

Source: Calculated by the authors.

Figure 6. **MEAN NUMBER OF HWS, DURATION AND TEMPERATURE EXCEEDANCE IN DONOSTIA-SAN SEBASTIÁN UNDER THE RCP 8.5 SCENARIO**



Source: Calculated by the authors.

3.2 Risk measures

We calculated risk measures using 50,000 simulations of correlated values. Table 11 shows these risk measures for the year 2100, where VaR (95%)¹ is the 95% percentile and ES (95%)² is the mean of values above the 95% percentile. These are standard finance risk measures (see Hull, 2012). The ES(95%) is a better risk measure as it represents the tail of the distribution better. As in financial & economic cases, this paper takes into account two risk measures (VaR and ES). We consider the expected mean to be an incorrect measurement since risk measures should capture the worst cases, which are less likely but possible.

Table 11 shows that under RCP 8.5 temperature exceedances in HWs in 2100 may exceed 5.53°C in Bayonne, 5.32°C Bilbao and 5.60°C in Donostia-San Sebastián in 5% of cases. Furthermore, the 95% percentile exceeds the expected mean temperature exceedance and shows values of 5.88°C, 5.62°C and 5.96°C respectively for the cities analysed.

¹ Value at Risk with 95% confidence level.

² Expected Shortfall with 95% confidence level.

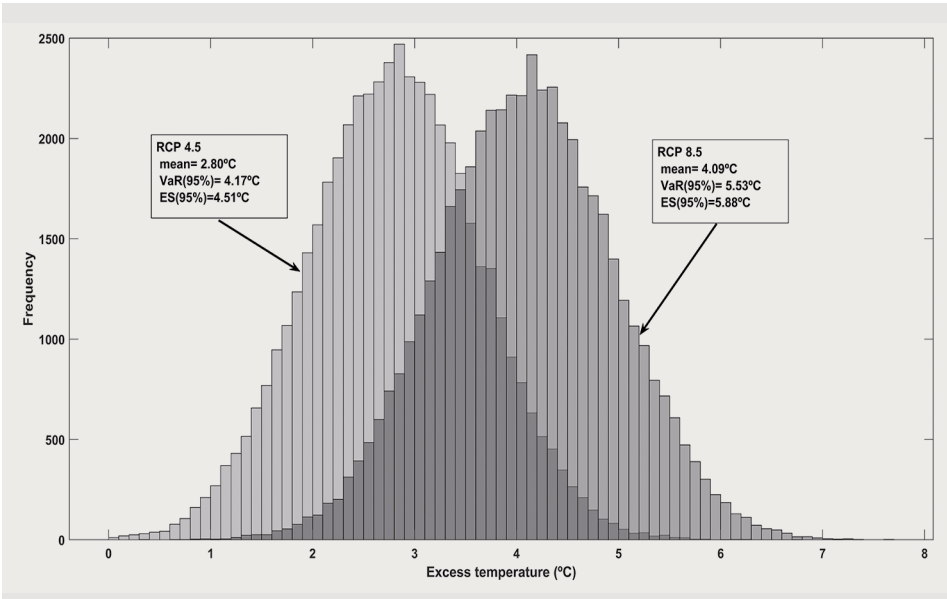
Table 11. **TEMPERATURE EXCEEDANCES ABOVE THE CRITICAL THRESHOLD FOR 2100 (°C). EXPECTED VALUES AND TWO RISK MEASURES**

City	Scenario	Mean	VaR(95%)	ES(95%)
Bayonne	RCP 4.5	2.80	4.17	4.51
	RCP 8.5	4.09	5.53	5.88
Bilbao	RCP 4.5	2.57	3.86	4.18
	RCP 8.5	4.06	5.32	5.62
Donostia San-Sebastián	RCP 4.5	2.66	4.04	4.39
	RCP 8.5	4.15	5.60	5.96

Source: Calculated by the authors.

Figure 7 illustrates the distributions for Bayonne under the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios.

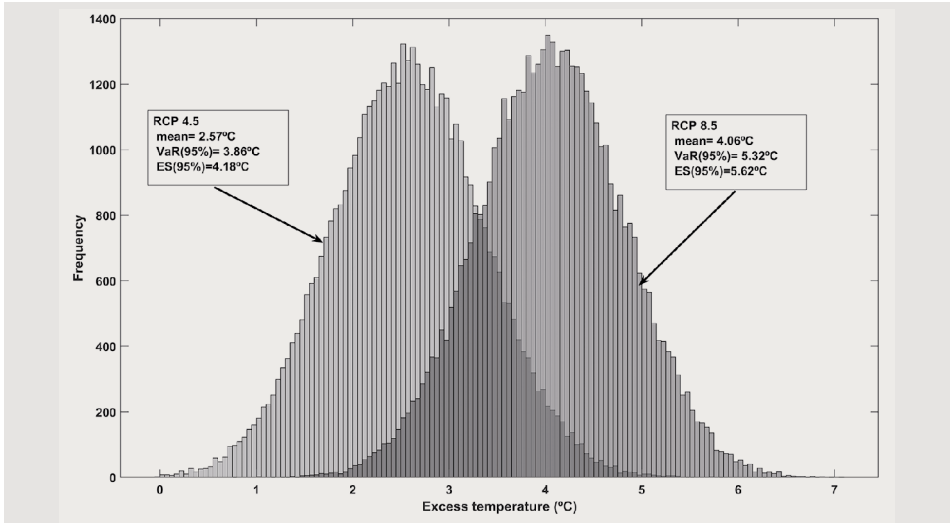
Figure 7. **DISTRIBUTION FOR BAYONNE TEMPERATURE EXCEEDANCE IN 2100**



Source: Calculated by the authors.

Figure 8 shows the temperature exceedance distributions for Bilbao.

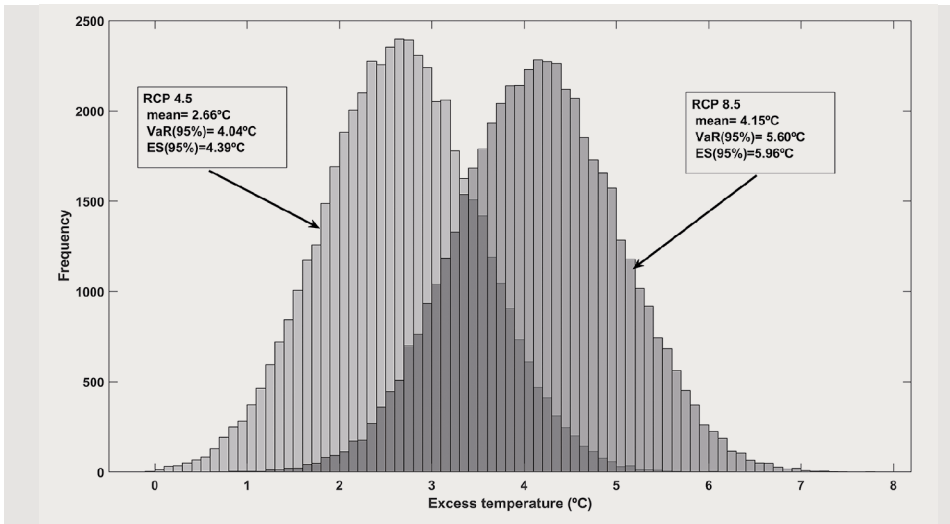
Figure 8. DISTRIBUTION FOR BILBAO TEMPERATURE EXCEEDANCE IN 2100



Source: Calculated by the authors.

Figure 9 shows the temperature exceedance distributions for Donostia-San Sebastián.

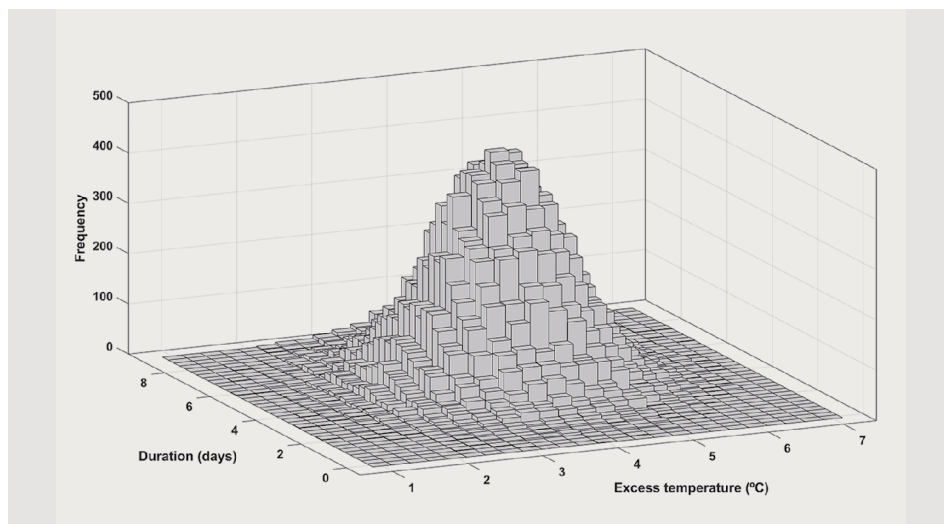
Figure 9. DISTRIBUTION FOR DONOSTIA-SAN SEBASTIÁN TEMPERATURE EXCEEDANCE IN 2100



Source: Calculated by the authors.

Figure 10 shows the joint distribution of temperature exceedance and duration for Bilbao in 2100 under RCP 8.5. Note that these variables are correlated.

Figure 10. BILBAO TEMPERATURE EXCEEDANCE AND HW DURATION IN 2100 UNDER RCP 8.5



Source: Calculated by the authors.

4. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

In this paper, we analyse the expected impacts of HWs under CC for the main Basque coastal cities. Three HW characteristics (number, duration and intensity) are considered and eight climate models are used under RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios. The time series of climate models present very different behaviours. For example, if we look at the number of HWs under RCP 8.5, we obtain a number of days above the critical temperature for the time series that ranges between 747 and 6,654 for Bayonne, 446 and 6,479 for Bilbao and 427 and 6,570 for Donostia-San Sebastián. In all cases, the Model 5 (IPSL-INERIES) has the least impact and the Model 6 (SMHI) the largest one. These different behaviours generate very different future distributions (HWs number, duration and intensity).

In all cases, we find expected increases over time in all three factors. Under RCP 8.5 our calculations show mean expected exceedances of the 30°C critical level of 4.19°C, for Bayonne, 4.05°C for Bilbao and 4.14°C for Donostia-San Sebastián by the end of the century. Minor but significant impacts are obtained using RCP 4.5, with expected mean temperature exceedances in 2100 of 2.79°C, 2.57°C and 2.65°C in the aforementioned cities. We obtain different results depending on which climate model is used

and in this work we give more importance at the mean of eight models. Nonetheless, the data of each model are shown in Tables 5 to 10 for both RCP 4.5 and RCP 8.5.

The expected number, duration and intensity of heatwaves are important information, but it must be kept in mind that there are correlated stochastic processes, so there is a risk that impacts may be higher than average. We, therefore, include some temperature exceedance risk measures, which are VaR(95%) and ES(95%). These risk measures provide information about the shape of the distribution tail. These values are very relevant because we should be prepared for the worst cases, that although less likely, are possible and their impact could be very dramatic.

Our calculations show that under RCP 8.5 and considering 5% worst of cases, the temperature exceedance in HWs in 2100 may be greater than 5.53°C in Bayonne, 5.32°C in Bilbao and 5.60°C in Donostia-San Sebastián. When the 95% percentile is exceeded, the expected mean temperature exceedances for these cities are 5.88°C, 5.62°C and 5.96°C. We obtain lower values under RCP 4.5, but these values are still important when we look at risk measures, VaR(95%) and ES(95%). We argue that we should be prepared for the most harmful cases using these risk measures and do not rely too much on the expected value since it is an average value under uncertainty.

As mentioned previously, the contributions of this work are twofold. First, the application of the model developed by Abadie *et al.* (2019) to the main Basque coastal cities. Second and more importantly, the analysis of different results when we use different climate models, because these results show that relying on the results from a single model, as done by Abadie *et al.* (2019) for Bilbao and Madrid, might be problematic.

APPENDIX THE STOCHASTIC MODEL

There is assumed to be a Poisson process that generates HWs. The mean number of HWs at time t is estimated using Equation 1:

$$\lambda(t) = \lambda(0)e^{at} \quad (1)$$

The duration of a HW cannot be zero days, so there is also assumed to be a gamma process that determines the duration in days of an HW when it occurs. The mean duration of HWs at time t is estimated using Equation 2:

$$d(t) = d(0)e^{rt} \quad (2)$$

In the gamma process their volatility is calibrated.

The temperature exceedance above 30°C is obtained from a zero-truncated normal distribution correlated with the HW duration. The mean temperature exceedance over 30°C at time t is estimated using Equation 3:

$$g(t) = g(0)e^{\beta t} \quad (3)$$

Correlation between temperature exceedance and duration can be simulated by obtaining random samples correlated for temperature exceedance using Equation 4:

$$\rho x_1 + x_2 \sqrt{1 - \rho^2} \quad (4)$$

where x_1 y x_2 are two independent, normalised samples of duration and temperature exceedance.

REFERENCES

- ABADIE, L.M.; CHIABAI, A.; NEUMANN, N.B. (2019): «Stochastic diffusion models to describe the evolution of annual HW statistics: A three-factor model with risk calculations», *Science of the Total Environment*, 646: 670-684. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.158>
- ABIODUN, B.J.; ADEGOKE, J.; ABATAN, A.A.; IBE, C.A.; EGBEBIYI, T.S.; ENGELBRECHT, F.; PINTO, I. (2017): «Potential impacts of CC on extreme precipitation over four African coastal cities», *Climatic Change*, 143: 399-413.
- CHRISTENSEN, J.H.; KANINICHARLA, K.K.; ALDRIAN, E.; AN, S. I.; CAVALCANTI, I.F.A.; DE CASTRO, M., *et al.* (2013): «Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional CC», in Chapter 14. Working Group I Contribution to the IPCC 5th Assessment Report (AR5). CC.
- CHRISTIDIS, N.; JONES, G.S.; STOTT, P.A. (2015): «Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 European heat-wave», *Nature Climate Change*, 5: 46-50. doi:10.1038/nclimate2468.
- DÍAZ, J.; CARMONA, R.; MIRÓN, I.J.; ORTIZ, C.; LEÓN, I.; LINARES, C. (2015): «Geographical variation in relative risks associated with heat: Update of Spain's Heat Wave Prevention Plan», *Environment International*, 85: 273-283. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.09.022>
- DÍAZ, J.; SÁEZ, M.; CARMONA, R.; MIRÓN, I.J.; BARCELÓ, M.A.; LUNA, M.Y.; LINARES, C. (2019): «Mortality attributable to high temperatures over the 2021-2050 and 2051-2100 time horizons in Spain: Adaptation and economic estimate», *Environmental Research*, 172: 475-485. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.02.041>
- HAYLOCK, M.R.; HOFSTRA, N.; KLEIN TANK, A.M.G.; KLOK, E.J.; JONES, P.D.; NEW, M. (2008): «A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950-2006», *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D20).
- HOFSTRA, N.; HAYLOCK, M.; NEW, M.; JONES, P. D. (2009): «Testing E-OBS European high-resolution gridded data set of daily precipitation and surface temperature», *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D21).
- HULL, J. (2012): Options, futures, and other derivatives, 8th ed. Pearson/Prentice Hall, Harlow.
- IPCC (2012): «Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation», Special Report of the Intergovernmental Panel on CC. Cambridge University Press, Cambridge.
- (2013): CLIMATE CHANGE 2013 «The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on CC», Cambridge University Press, Cambridge.
- JACOB, D.; PETERSEN, J.; EGGERT, B.; ALIAS, A.; CHRISTENSEN, O.B.; BOUWER, L.M., *et al.* (2014): «EURO-CORDEX: new high-resolution CC projections for European impact research», *Regional Environmental Change*, 14(2): 563-578.
- KOTLARSKI, S.; KEULER, K.; CHRISTENSEN, O.B.; COLETTE, A.; DÉQUÉ, M.; GOBIET, A.; WULFMEYER, V. (2014): «Regional climate modeling on European scales: A joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble», *Geoscientific Model Development*, 7(4): 1297-1333. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1297-2014>
- LELIEVELD, J.; PROESTOS, Y.; HADJINICOLAOU, P.; TANARHTE, M.; TYRLIS, E.; ZITTIS, G. (2016): «Strongly increasing heat extremes in the Middle East and North Africa (MENA) in the 21st century», *Climatic Change*, 137(1-2): 245-260.
- LHOTKA, O.; KYSELÝ, J.; FARDA, A. (2018): «Climate change scenarios of heat waves in Central Europe and their uncertainties», *Theoretical and Applied Climatology*, 131(3-4): 1043-1054.
- LO, Y.T.E.; MITCHELL, D.M.; GASPARRINI, A.; VICEDO-CABRERA, A.M.; EBI, K.L.; FRUMHOFF, P.C.; MILLAR, R.J.; ROBERTS, W.; SERA, F.; SPARROW, S.; UHE, P.; WILLIAM, G. (2019): «Increasing mitigation ambition to meet the Paris Agreement's temperature goal avoids substantial heat-related mortality in

- U.S. cities», *Science Advances*, 5(6): eaau4373. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau4373>
- MITCHELL, D.; HEAVISIDE, C.; VARDOLAKIS, S.; HUNTINGFORD, C.; MASATO, G.; GUILLOD, B.P.; FRUMHOFF, P.; BOWERY, A.; WALLOM, D.; ALLEN, M. (2016): «Attributing human mortality during extreme heat waves to anthropogenic climate change», *Environmental Research Letters*, 11: 074006.
- MUELLER, B.; ZHANG, X.; ZWIERS, F.W. (2016): «Historically hottest summers projected to be the norm for more than half of the world's population within 20 years», *Environmental Research Letters*, 11: 044011.
- NAKICENOVIC, N.; ALCAMO, J.; GRUBLER, A.; RIAHI, K.; ROEHRL, R.A.; ROGNER, H.-H.; VICTOR, N. (2000): «Special report on emissions scenarios (SRES), a special report of Working Group III of the intergovernmental panel on climate change», Cambridge University Press.
- OUZEAU, G.; SOUBEYROUX, J.-M.; SCHNEIDER, M.; VAUTARD, R.; PLANTON, S. (2016): «Heat waves analysis over France in present and future climate: application of a new method on the EURO-CORDEX ensemble», *Climate Services*, 4: 1-12.
- PEREIRA, S.C.; MARTA-ALMEIDA, M.; CARVALHO, A.C.; ROCHA, A. (2017): «Heat wave and cold spell changes in Iberia for a future climate scenario», *International Journal of Climatology*, 37(15): 5192-5205.
- RIAHI, K.; KREY, V.; RAO, S.; CHIRKOV, V.; FISCHER, G.; KOLP, P.; KINDERMANN, G.K.; NAKICENOVIC, N.; RAFAI, P. (2011): «RCP-8.5: exploring the consequence of high emission trajectories», *Climatic Change*. November 2011: 109:33. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>
- RUSSO, S.; SILLMANN, J.; FISCHER, E.M. (2015): «Top ten European HWs since 1950 and their occurrence in the coming decades», *Environmental Research Letters*, 10(12): 124003.
- SAINZ DE MURIETA, E.; ABADIE, L.M., GALARRAGA, I. (2018): «Aumento del nivel del mar en la costa vasca: una aproximación probabilística», *Economiaz*, 94: 324-344.
- SILLMANN, J.; KHARIN, V.V.; ZWIERS, F.W.; ZHANG, X.; BRONAUGH, D. (n.d.): «Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections», *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(6): 2473-2493.
- SMID, M.; COSTA, A.C. (2017): «Climate projections and downscaling techniques: a discussion for impact studies in urban systems», *International Journal of Urban Sciences*, 22(3): 277-307.
- SMITH, S.J.; WIGLEY, T.M.L. (2006): «Multi-gas forcing stabilization with Minicam», *The Energy Journal*, 27: 373-391.
- SOARES, P.M.M.; CARDOSO, R.M. (2018): «A simple method to assess the added value using high-resolution climate distributions: application to the EURO-CORDEX daily precipitation», *International Journal of Climatology*, 38(3): 1484-1498.
- VAN VUUREN, D.P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; HURTT, G.C.; KRAM, T.; KREY, V.; LAMARQUE, J.-F.; MASUI, T.; MEINSHAUSEN, M.; NAKICENOVIC, N. (2011): «The representative concentration pathways: an overview», *Climatic change*, 109(1-2), 5.
- VAUTARD, R.; GOBIET, A.; JACOB, D.; BELDA, M.; COLETTE, A.; DÉQUÉ, M.; FERNÁNDEZ, J.; GARCÍA-DÍEZ, M.; GOERGEN, K.; GÜTTLER, I.; HALENKA, T.; KARACOSTAS, T.; KATRAGKOU, E.; YIOU, P., et al. (2013): «The simulation of European heat waves from an ensemble of regional climate models within the EURO-CORDEX project», *Climate Dynamics*, 41(9-10): 2555-2575. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1714-z>
- WMO (2015): «Heatwaves and health: guidance on warning-system development», WMO, Geneva, Switzerland. https://www.who.int/globalchange/publications/WMO_WHO_Heat_Health_Guidance_2015.pdf

Cambio climático, riesgo de inundación y medidas de adaptación: retos en la valoración de daños y evaluación de medidas

Climate change, flood risk and adaptation measures: challenges in assessing damage and evaluating of measures

Las inundaciones suponen un importante riesgo para el bienestar de las personas por el gran impacto que causan. Por ello, distintas instituciones han emprendido planes para la mejora de sistemas de alerta y prevención, mejoras que requieren información lo más precisa posible sobre los riesgos a los que se enfrenta la población y el entorno, los cuales se definen como la combinación de la probabilidad de darse un determinado suceso y el daño que potencialmente causaría. Este estudio tiene como fin avanzar en el establecimiento de metodologías que faciliten el análisis del riesgo, para lo cual se examinan varios de los estudios realizados en este contexto con el objetivo de extraer pautas metodológicas que puedan ser utilizadas en proyectos fluviales y áreas costeras.

Uholdeak oso arriskutsuak dira pertsonen ongizaterako, eragin handia dute haien bizitzan. Horregatik, erakunde horiek alerta eta prebentzio sistemak hobetuko dituzten planak prestatu dituzte. Baina hobekuntza horiek ezarri nahi badira informazio ahalik eta zehatzena behar da biztanleek eta inguruneak dituzten arriskuei buruz, betiere arrisku moduan ulertuta gertaera jakin bat gertatzeko probabilitatearen eta horrek dakarren kaltearen batura. Azterlan honen bidez, arriskua aztertzen lagunduko duten metodologiak ezartzen jarraitu nahi da; helburu horrekin, hain zuzen, testuinguru horretan egin diren ikerketa batzuk aztertu dira, gero ibaietako eta kostaldeko proiektuetan erabili ahal izango diren metodologia-arauak lortzeko.

Floods generate a considerable risk to human wellbeing due to the great impacts they cause. This is the reason behind the plans developed by different institutions that have the objective of improving alert and prevention systems. This improvement requires information as precise as possible about the risks population and environment are facing, risks that are defined as the combination of the probability of a certain event and the damage it would cause. This study has therefore the aim of helping the development of different methodologies capable of making easier the analysis of risk. In order to achieve this objective, it examines various studies performed in this context, with the intention of extracting methodological guidelines to be used in future projects in basins and coastal areas.

Pablo Martinez-Juarez

Health Economics Group, University of Exeter Medical School

Sébastien Foudi

Basque Centre for Climate Change (BC3)

Ibon Galarraga

Basque Centre for Climate Change (BC3)

Nuria Osés-Eraso

Departamento de Economía e INARBE, Universidad Pública de Navarra

Emilio Cerdá

*Departamento de Análisis Económico e ICEI,
Universidad Complutense de Madrid*

Índice

1. Introducción
2. Marco teórico del análisis del riesgo y de la evaluación de las medidas de adaptación
3. Cinco casos de estudios de la literatura
4. Discusión sobre los retos de la valoración del riesgo y evaluación de medidas de adaptación
5. Conclusiones

Referencias bibliográficas

Palabras Clave: inundabilidad, análisis coste-beneficio, análisis de riesgo.

Keywords: flooding, cost-benefit analysis, risk assessment.

Nº de clasificación JEL: H430; I310; Q540; Q580.

Fecha de entrada: 04/05/2020

Fecha de aceptación: 22/05/2020

Agradecimientos: Ibon Galarraga y Sébastien Foudi agradecen el apoyo del Gobierno Vasco a través del programa BERC 2018-2021 y al Ministerio de Economía y Productividad MINECO a través de la acreditación de excelencia BC3 María de Maeztu MDM-2017-0714.

1. INTRODUCCIÓN

Existe un doble motivo para el estudio exhaustivo de los riesgos derivados de riadas e inundaciones. En primer lugar, la severidad de los impactos producidos por estos fenómenos. Las inundaciones fueron responsables de casi dos tercios de las pérdidas compensadas por aseguradoras del Estado español entre los años 1987 y

2012 (Consortio de Compensación de Seguros, 2019), si bien esta puede ser una subestimación de los perjuicios totales. En segundo lugar, se espera que el cambio climático genere mayores riesgos por inundaciones. Esto se debe a que este aumentaría la probabilidad e intensidad de eventos climatológicos extremos. Así lo refleja la Agencia Europea del Medio Ambiente a través de un informe elaborado sobre las futuras incidencias de los desastres naturales en Europa (European Environment Agency, 2011) que describe una tendencia alcista en el número de inundaciones registradas en los últimos años. Por ello, ha sido necesario tomar de medidas por parte de las autoridades, en un esfuerzo por blindar tanto a la población como a la actividad económica frente a los riesgos derivados de las inundaciones.

Los impactos generados por las riadas no solo son considerables en su magnitud, también en su diversidad. Para el análisis de estos impactos, es habitual distinguir entre efectos directos e indirectos, y el carácter tangible o intangible de los mismos. Desde un punto de vista menos teórico, los daños se pueden dividir de otras formas, como por ejemplo, según el sector económico en el que inciden (vivienda, comercial, industrial, etc.), o según el sujeto sobre el que tienen efecto (si los efectos son sufridos por personas, otros tipos de seres vivos u objetos, etc.). Los efectos de una inundación dependen en gran medida de los patrones de asentamiento humanos y las formas de uso del terreno, así como de la capacidad humana para la prevención y la toma de medidas previas (Parry *et al.*, 2007; Ayala Carcedo, 2002; Foudi y Osés-Eraso, 2014; García Cordón, 2004).

Uno de los factores que más preocupa a las partes interesadas es el probable empeoramiento de la situación en un contexto de cambio climático. Según lo expuesto por los modelos climáticos, el calentamiento atmosférico generará una aceleración del ciclo del agua, aumentando la evapotranspiración a la vez que también aumentaría su capacidad de carga de humedad y su energía potencial (Kundzewicz y Schellnhuber, 2004). Esto implicaría un aumento de los impactos generados por las inundaciones.

El análisis de impactos debe incluir asimismo la probabilidad de que este suceda, o, en otros términos, la frecuencia de estos acontecimientos, para establecer el riesgo de inundación. El riesgo es definido en los análisis de forma semejante a la forma tomada por la Directiva Europea (CE, 2007), como la «combinación de la probabilidad de que se produzca una inundación y de las posibles consecuencias negativas para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural y la actividad económica, asociadas a una inundación». El riesgo viene, entonces, determinado por la amenaza del evento unida a la vulnerabilidad del área. El estudio de los riesgos es requisito indispensable para el desarrollo de medidas que lo palién. Tales medidas no son iguales a la hora de prevenir eventos de gran magnitud que los de menor, dándose el potencial caso de que medidas destinadas a paliar un riesgo exacerben otro.

Existe, aun así, un gran nivel de incertidumbre. El primer factor a tener en cuenta es que conocer la probabilidad de una avenida no implica saber en qué momento acontecerá. Esto implica la necesidad de tomar medidas genéricas de protección, como el encauzamiento de ríos o la protección de humedales capaces de absorber parte de las riadas. Sin embargo, estos métodos deben ser complementados con medidas adicionales, como sistemas de alerta, que funcionan solo en las ocasiones en las que sobreviene una inundación, pero que deben ser funcionales en todo momento. Otra importante fuente de incertidumbre es la derivada de la excepcionalidad de los eventos extremos. La escasa frecuencia de las grandes avenidas dificulta su análisis (Ayala Carcedo, 2002) mostrando que en los últimos 50 años, el 94% de las víctimas en desastres por inundación se producen en inundaciones relámpago en pequeñas cuencas, donde la medida preventiva indicada es la Ordenación del Territorio. A través del análisis del conocimiento actual sobre la previsión en torno al cuándo, cómo y dónde, se llega a la conclusión de que todas las inundaciones son suficientemente previsibles para prevenir sus efectos, siendo por tanto un sofisma la afirmación que suele hacerse tras los desastres de que la inundación fue imprevisible para evadir posibles responsabilidades. Se analiza para España la problemática existente, constatándose, especialmente tras la inundación-relámpago de Biescas (Pirineo Aragonés). La construcción de modelos climáticos y mapas de riesgos es, por tanto, una tarea aún más compleja cuando se analizan incidentes de alto impacto.

Estas necesarias actuaciones tienen el inconveniente de depender en excesiva medida del tipo de avenida cuyos efectos pretenden paliar (Foudi y Osés-Eraso, 2014; Markandya, Galarraga y Sainz de Murieta, 2014). Trabajos que logran disminuir los efectos de avenidas pequeñas pueden agravar las consecuencias de las de mayor peligrosidad, mientras que las medidas capaces de lidiar con eventos excepcionalmente dañinos pueden tener repercusiones sobre el día a día de los ciudadanos o sobre la economía a distinta escala, ya sea por el coste del proyecto o por el impacto de la obra.

El objetivo de este estudio es discutir los retos de la estimación del riesgo de inundación y de la evaluación de las medidas de adaptación. Desafíos importantes existen tanto en la estimación de daños evitados como en la estimación de beneficios intangibles, tal y como los efectos en la salud o los ecosistemas que soportan el bienestar de la sociedad. Varios métodos ayudan a evaluar los efectos de una política de prevención, desde el análisis coste-beneficio al análisis coste-efectividad o análisis multicriterio. La capacidad de monetizar los daños es a menudo un criterio usado para elegir el método. Con este fin, el artículo presenta un marco teórico del análisis del riesgo de inundación presente en la literatura y recopila una selección de casos de estudio, tanto de inundaciones fluviales como por aumento del nivel del mar, incluyendo el cambio climático o el caso de obras de adaptación. Una discusión de los elementos clave de la valoración de riesgo y evaluación de medidas presenta los retos en los que se necesita avanzar para tratar la reducción del riesgo de inundación. Esta recopilación de 5 casos de estudio permite, por una parte, ofrecer una descripción metodológica de un análisis coste-beneficios y análisis de impactos del cambio climático para permitir su apli-

cación en otros contextos, y ofrecer estimaciones de las magnitudes de los potenciales daños causados por las inundaciones en distintos contextos.

El orden de los contenidos será el siguiente: el segundo apartado examinará algunas nociones básicas para el estudio del riesgo de inundabilidad y la evaluación de medidas de adaptación halladas en la literatura. El tercer apartado presenta cinco casos de estudio –en las cuencas fluviales de los ríos Ebro (Foudi *et al.*, 2015), Urola (Osés-Eraso, 2009) e Ibaizabal-Nerviión (Galarraga *et al.*, 2011, Osés-Eraso *et al.*, 2012), y en la costa vasca (Galarraga *et al.*, 2011)–, su descripción y resultados. El apartado cuarto discute sobre los retos de la valoración del riesgo. El apartado quinto remarcará las conclusiones obtenidas por el estudio y tratará de dibujar una serie de recomendaciones de política en base a la experiencia acumulada.

2. MARCO TEÓRICO DEL ANÁLISIS DEL RIESGO Y DE LA EVALUACIÓN DE LAS MEDIDAS DE ADAPTACIÓN

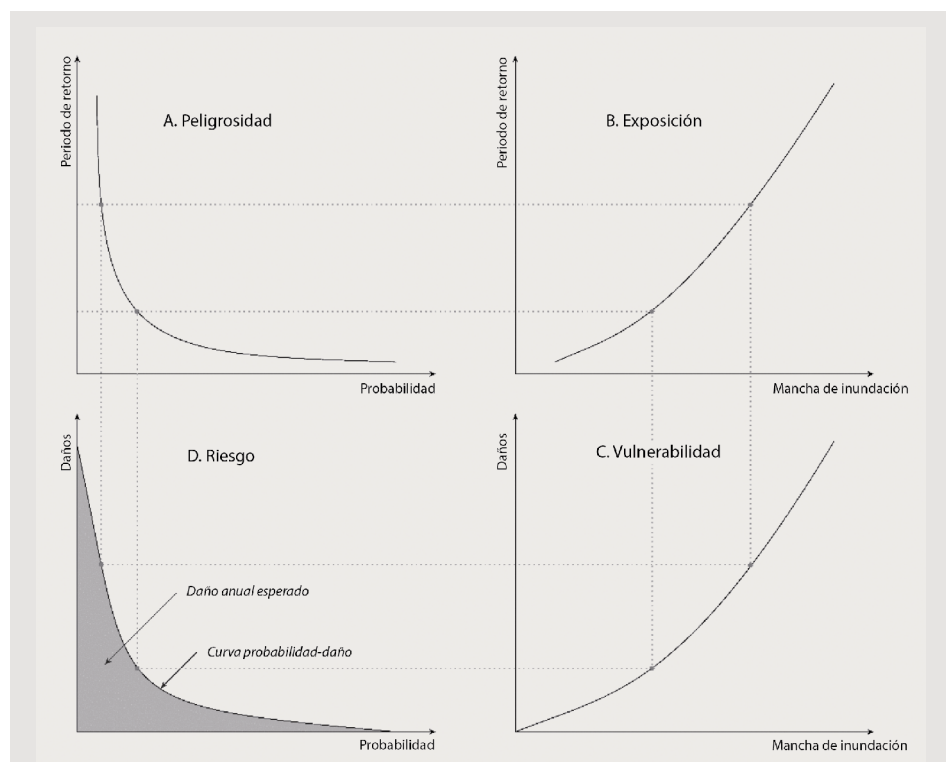
2.1. Estimación del riesgo

Resulta conveniente introducir la clasificación de los daños empleada en los casos de estudio aquí presentados. La clasificación más habitual distingue los daños dividiéndolos en cuatro grupos de dos dimensiones: dependiendo de la forma en la que el evento provoca el daño (Balbi *et al.*, 2013; Foudi y Osés-Eraso, 2014), por ejemplo, si este es causado por el evento en sí o a través de una cadena de sucesos, y dependiendo de la facilidad con la que los daños sean contabilizables de forma monetaria posteriormente. Se distinguen daños directos y tangibles –causados de forma directa por el evento y que son monetizables a través de mecanismos de mercado (Foudi y Osés-Eraso, 2014)–; daños directos e intangibles –daños causados por el evento en bienes que no son intercambiados habitualmente en el mercado y por tanto requieren de mecanismos de valoración alternativos, y que sin embargo son causa directa de la inundación–; daño indirecto y tangible –consideraciones temporales, espaciales y sectoriales entran en juego al distinguir daños directos e indirectos, pero una definición genérica dada por Foudi y Osés-Eraso (2014) hablaría de daños causados a distintas escalas–; daño indirecto e intangible –daños que no son directos ni monetizables por mecanismos habituales.

La estimación del riesgo de inundabilidad combina la estimación de elementos como la amenaza o peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad (Gráfico nº 1). El riesgo se determina como el producto de la probabilidad de amenaza por las consecuencias o daños (Kron, 2002; Penning-Rowsell *et al.*, 2005; Messner y Meyer, 2005; Foudi y Osés-Eraso, 2014). Unas medidas del riesgo pueden ser la propia curva de probabilidad-daño y el daño anual esperado (Foudi *et al.*, 2015). La amenaza del suceso (cuadro A, Gráfico nº 1) se define como la probabilidad de que una inundación dañina acontezca (Schanze, 2006). Existe una relación inversa entre la magnitud del evento potencialmente nocivo (la inundación) y su probabilidad o frecuencia esperada, es decir, las inundaciones de mayor magnitud son menos habituales que aque-

llas que causan menor cantidad de daños. Los factores que determinan el potencial destructor de una riada u otro tipo de inundación son su volumen de agua, el nivel que esta alcanza, la velocidad o la dinámica temporal. En base a estas características se establece un periodo de retorno, que es el tiempo medio transcurrido entre dos eventos de similares características. De manera inversa, se puede calcular la probabilidad anual de suceso $t_r = \frac{1}{p_r}$, donde t_r denota el periodo de retorno y p_r es la probabilidad de que el suceso se dé en un año determinado.

Gráfico n° 1. **DESCOMPOSICIÓN DE LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN**



Fuente: Adaptado de Foudi y Osés-Eraso, 2014.

La capacidad de causar daño de una inundación depende de su magnitud, pero también de la exposición al riesgo (cuadro B, Gráfico n° 1). Esta varía en función del nivel de asentamiento humano en el entorno del área inundable. Para analizar la exposición se contabilizan los activos que se hallan en la mancha de inundación. Los eventos cuyas características son más violentas y que tienen un periodo de retorno mayor provocan daños en un área de mayor tamaño, es decir, existe una relación directa entre el periodo de retorno y la mancha que provoca, lo cual hace que la canti-

dad de bienes expuestos aumente. Pero todo aquello expuesto no tiene por qué ser igualmente impactado. Su vulnerabilidad determina el impacto final, viene determinada por las características socioeconómicas del entorno y la sensibilidad de los bienes expuestos a la inundación (cuadro C, Gráfico nº 1). La estimación de unas funciones de daños permite determinar la relación entre el daño, las características de la inundación, como la altura del agua o la velocidad, y la sensibilidad de los elementos frente a la amenaza. Estas funciones se estiman en términos absolutos o relativos. A través del cálculo de estas variables es posible estimar el riesgo de inundación. Este viene definido como la probabilidad de que se dé un suceso concreto en relación con los daños que causa (cuadro D, Gráfico nº 1). La función relaciona la probabilidad de un evento con los daños que causa. Esta curva de probabilidad-daño permite estimar el daño anual esperado (DAE), que queda definido como

$$DAE(x) = \int_0^1 x(p_r) dp_r \quad (1)$$

donde x denota una cantidad de daños y (p_r) la probabilidad de éstos. Es decir, el área bajo la curva de daño-probabilidad representa el DAE.

2.2. Evaluación del impacto del cambio climático y de cambios socioeconómicos

De acuerdo con lo expuesto, los factores que afectan a la estimación del riesgo de inundación pueden agruparse en dos bloques: factores socioeconómicos (S), como exposición, vulnerabilidad y funciones de daño; y factores climáticos (C), como peligrosidad y períodos de retorno. Cambios en los factores socioeconómicos y climáticos pueden alterar la estimación del riesgo, mejorando o empeorando el escenario de referencia (Osés-Eraso, 2009). El escenario de referencia o base presenta las características del momento del estudio, tanto en la dimensión socioeconómica como en la climática. El daño anual esperado asociado a este escenario vendría denotado como $DAE(S_0, C_0)$. Un escenario proyectado altera uno o varios de los factores y estos escenarios pueden descomponerse de manera secuencial. Un escenario base proyectado, por ejemplo, puede presentar una situación en la que los cambios socioeconómicos son tenidos en cuenta pero no así los climáticos, de forma que el riesgo viene expresado como $DAE(S_1, C_0)$. La diferencia $DAE(S_1, C_0) - DAE(S_0, C_0)$ expresa el cambio en el riesgo debido al cambio en la estructura social. Además de este segundo escenario, se requiere un tercero que añada las variables climáticas. Este escenario, cuyo riesgo vendría expresado como $DAE(S_1, C_1)$, se caracterizaría por emplear tanto predicciones sobre la evolución socioeconómica como sobre la evolución del clima en el plazo descrito. Dada una situación de cambio social, el efecto del cambio climático sobre el riesgo de inundación sería $DAE(S_1, C_1) - DAE(S_1, C_0)$.

2.3. Evaluación de las medidas de prevención y adaptación

Uno de los objetivos de las estimaciones de riesgo es poder determinar la eficiencia y la eficacia de medidas destinadas a reducir estos riesgos. La importancia de esto se ve incrementada en un contexto en el que la adaptación al cambio climático toma protagonismo en las políticas públicas.

Una de las herramientas empleadas para trasladar los riesgos, costes y beneficios futuros al presente es la del Valor Presente Neto (VPN). El VPN (ecuación nº 2) se basa en la sustracción de los costes sobre los beneficios y, por ello, está vinculado al análisis coste-beneficio. Este análisis permite estimar la rentabilidad tanto de medidas de prevención genéricas como de medidas de adaptación al cambio climático.

$$VPN = -I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1 + r_t)^t} (B_t - I_t) \quad (2)$$

donde (I_0) correspondería al coste inicial de la medida o de la inversión, $B_t - I_t$ al beneficio neto para cada periodo, el cual vendría dado por la diferencia entre beneficios (B) y costes de inversión (I) para cada periodo (t) y r_t a la tasa de descuento. Los costes corresponden a gastos de mantenimiento o de seguimiento de la medida o programa de prevención o adaptación. Los beneficios corresponden a los daños evitados por la medida. La inclusión de co-beneficios o de costes indirectos permite tener una evaluación más completa de la medida o del programa. El análisis coste-beneficio es un método apropiado cuando los propios beneficios y costes son fácilmente medibles en términos monetarios. Sin embargo, frente a beneficios intangibles como los efectos en la salud o los ecosistemas o efectos cuya monetización es debatible, otras herramientas como el análisis coste-efectividad o multicriterio puede ofrecer una alternativa al análisis de las medidas de adaptación. El análisis a través del valor presente neto es, además, compatible con otras formas de análisis como los análisis de sensibilidad o el propio análisis multicriterio, que permite complementar este análisis desde una perspectiva más cualitativa.

Una medida de prevención puede influir tanto en la exposición como en la vulnerabilidad de la sociedad frente al peligro. Una infraestructura urbana, como un dique o una obra ambiental, como la restauración de un ecosistema de ribera, conseguiría reducir la mancha de inundación de un periodo de retorno dado. La curva del cuadro B del gráfico nº 1 se desplazaría hacia la izquierda, aunque no necesariamente de manera homogénea. La forma de la curva se podría modificar según el periodo de retorno que la medida pretenda tratar. Otras medidas afectarían a la vulnerabilidad de los elementos afectados. Un sistema de alerta temprana permite la elevación o retirada de los bienes expuestos reduciendo la sensibilidad a la inundación y permitiendo reducir los daños finales. La curva del cuadro C, gráfico nº 1 se desplazaría hacia abajo y su forma podría cambiar. Estos daños evitados conseguidos por las medidas de prevención modificarían la curva de probabilidad-daño y, en consecuencia, reducirían el DAE (cuadro D, Gráfico nº 1).

Cuadro nº 1. RESUMEN DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Estudio	Osés-Eraso (2009)	Galarraga et al. (2011)	Galarraga et al. (2011)	Osés-Eraso et al. (2012)	Foudi et al. (2015)
Tipo de inundación	Fluvial	Fluvial	Costera	Fluvial	Fluvial
Zona de estudio	Río Urola (7 municipios)*	Río Nervión (Amurrio)	Costa Vasca	Canal de Deusto (Bilbao)	Río Ebro (6 municipios)**
Períodos de retorno	10, 100, 500	50, 100, 500		10, 100, 500	5, 10, 25, 50, 100, 500
Daños estimados:					
- Áreas residenciales	X	X		X	X
- Áreas no residenciales	X	X		X	X
- Patrimonio cultural	X	X		X	
- Áreas agrícolas					X
- Ecosistemas			X		X
- Salud humana	X	X		X	X
- Otros		X		X	
Estimación de riesgo:					
- Curva probabilidad-daño	X	X		X	X
- Daño anual esperado	X	X		X	X
Escenarios de cambio climático	X	X	X		
Medidas de adaptación				X	

* Legazpi, Urretxu, Zumárraga, Azkoitia, Azpeitia, Zestoa, Zumaia.

** Zaragoza, Pastriz, Alfajarín, El Burgo de Ebro, Nuez de Ebro, Villafranca de Ebro.

Fuente: Elaboración propia.

La evaluación no está exenta de incertidumbre, ya que depende del cálculo que se realice del riesgo a evitar, de los supuestos utilizados en cuanto al clima, de la hidrología, de la eficiencia de las medidas o de la tasa de descuento. Para paliar los efectos de la incertidumbre, puede resultar útil el uso de distintos escenarios. La construcción de escenarios es un recurso frecuentemente utilizado en campos donde el cambio climático puede tener efectos significativos. En este sentido, los escenarios construidos a partir de los senderos de concentración (RCP) complementan a los escenarios socioeconómicos basados en los senderos socioeconómicos compartidos (SSP).

3. CINCO CASOS DE ESTUDIOS DE LA LITERATURA

Se presentan 5 casos de estudios relativos a inundaciones fluviales y costeras. Cuatro son estudios de valoración de los impactos en un escenario base, con o sin proyecciones socioeconómicas o climáticas, y uno del impacto de una medida de adaptación, como es la apertura del canal de Deusto en Bilbao. El caso del río Ebro a su paso por Zaragoza es un caso de evaluación de los impactos de las inundaciones en un escenario base. Los casos del río Nervión a su paso por el municipio de Amurrio, del río Urola en toda su cuenca y de las inundaciones costeras incluyen escenarios socioeconómicos y climáticos.

El cuadro nº 1 resume las principales características de los estudios revisados: tipo de inundación, zona de estudio, períodos de retorno incluidos en los estudios hidrológicos de partida, daños estimados, estimación del riesgo utilizada y si incluyen o no escenarios de cambio climático y/o análisis de medidas de adaptación en el análisis.

3.1. El río Ebro

Descripción

El estudio de Foudi *et al.* (2015) se ocupa de seis municipios de la cuenca del Ebro en la provincia de Zaragoza extendidos en 90 km². La ribera fluvial analizada está habitada por unas 680.000 personas, el 98% de las cuales residen en la capital. Para el cálculo de la amenaza a la que están sujetas personas y bienes en el área, los autores recurrieron a los datos hidrológicos de la Confederación Hidrográfica del Ebro. El análisis cubre periodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años. A través de estos datos se confeccionó un índice que permitiría evaluar la peligrosidad para las personas de estas potenciales inundaciones, el cual fue construido a partir de la profundidad de la inundación, la velocidad y la cantidad de escombros arrastrados por la inundación. Para analizar la exposición los usos del suelo se clasificaron utilizando la distinción catastral: suelo urbano residencial, urbano no residencial, agrario y humedales. Además de ello, el análisis incluyó también los daños a la salud de las personas, directos e indirectos, así como impactos ambientales. Para analizar la vulnerabilidad, el estudio realizó un análisis econométrico para estimar funciones de daño como una función de las características hidrológicas antes descritas. Los datos se transfirieron y adaptaron de la base de datos de Penning-Rowsell *et al.* (2005).

Los daños se calculan tanto para zonas urbanas como para zonas rurales y se desglosan según el tipo de bien afectado y sus características concretas. Podemos distinguir, por tanto, 12 tipos de daños divididos en tres grupos. En primer lugar, el daño en la propiedad residencial distingue entre (a) el daño generado en el inventario, (b) costes de limpieza y (c) reparación de los daños en edificios. Segundo, los perjuicios en propiedades no residenciales vienen clasificados por el tipo de uso que se da a la propiedad. Así, se distinguen siete grupos en total: (d) espacios comerciales, (e) áreas industriales, (f) infraestructuras, (g) locales de ocio, (h) centros de salud, (i) instalacio-

nes deportivas y (j) almacenes. En tercer lugar, en el espacio rural se consideran (k) las pérdidas económicas vinculadas a la producción agrícola y (l) daños derivados de pérdidas en servicios ecosistémicos, dependiendo del valor económico y ecológico de los humedales de la ribera del Ebro en el área de análisis. El valor económico se basa en la disposición a pagar por los servicios ecosistémicos de humedales.

Principales resultados

Los resultados finales recogidos por Foudi *et al.* (2015) aparecen indicados en términos de daño anual esperado en el cuadro nº 2 y sirven para resumir los efectos de las inundaciones en el área. Pese a ser el municipio con mayor población, tanto en términos absolutos como en densidad, Zaragoza no sufre los mayores impactos sobre la propiedad residencial. Esto se debe a la mejor capacidad de la ciudad para prevenir los daños gracias a estructuras de defensa contra las inundaciones y la calidad de los edificios.

Cuadro nº 2. **RESUMEN DE LOS DAÑOS ANUALES ESPERADOS (DAE)
EN ZARAGOZA Y EL RESTO DE MUNICIPIOS DE LA ZONA,
EN MILLONES DE EUROS**

	Sector residencial	Sector no residencial	Agricultura	Salud	Medio-ambiente	Sociedad
Zaragoza	36,5	121,56	0,31	5,34	NA	163,64
Resto municipios	105,39	50,53	1,27	2,97	NA	160,16
Total	141,89	172,09	1,58	8,31	7,71	331,43

Fuente: Elaboración propia.

El DAE es un indicador sintético del riesgo. Las curvas de probabilidad-daño completan el análisis del riesgo informando sobre la distribución de éste y a qué tipo de riesgo deben destinarse las medidas de adaptación. En este caso de estudio, se observa que la mayor necesidad de reducir el riesgo de origen residencial estaría en algunos pueblos como Alfajarín, ya que tiene el DAE más alto, y, de manera casi equivalente, en ciudades como Pastriz y Zaragoza. En el caso de estas dos últimas ciudades, aunque el DAE sea parecido, la distribución del riesgo es muy diferente según las curvas de probabilidad-daño. Pastriz experimenta daños más altos que Zaragoza debido a inundaciones más frecuentes. Por ello, Pastriz necesitaría medidas de prevención del riesgo para inundaciones frecuentes, mientras que Zaragoza, ya protegida por diques, sufriría daños altos por eventos menos frecuentes.

3.2. El río Nervión

Descripción

La inundación fluvial analizada en el estudio de Galarraga *et al.* (2011) se centra en el municipio de Amurrio, situado en la cuenca hidrográfica del Cantábrico y

atravesado por el río Nervión. El estudio fue motivado por el potencial efecto del cambio climático en el riesgo de inundación y analizó los impactos de tres niveles de inundación: el menos destructivo, con un periodo de retorno de 50 años; uno de 100 años; y el de mayor magnitud, de 500 años. Los estudios realizados por Labein-Tecnalia, empleados por los autores, analizan estos tres períodos de retorno en el momento de realizar los estudios y en una predicción climática con horizonte 2050. La clasificación de daños (a-i) realizada diferencia cinco grupos: primero, los daños relacionados con la propiedad residencial, subdivididos entre (a) directos y (b) indirectos; segundo, el daño en la propiedad no residencial, incluyendo perjuicios (c) directos y (d) indirectos (los debidos al posible cese temporal de una actividad); tercero, (e) los daños al patrimonio cultural; cuarto, los daños sobre la salud humana, clasificados esta vez entre (f) los causados por el evento propiamente dicho, (g) los relacionados por las actividades posteriores al suceso y (h) aquellos que se originan ante la posibilidad de repetición del evento; y quinto, (i) el resto de daños (interrupción del transporte, coste de las emergencias y efectos de segundo orden).

Principales resultados

El estudio predice importantes efectos de los cambios socioeconómicos y climáticos en el municipio alavés. Los autores estiman tres escenarios (mínimo, medio y máximo) para cada tipo de avenida. En el estudio se destaca que los daños en el escenario base para periodos de retorno de 50 años oscilarían entre los 9,4 millones de euros (a precios de 2005) y un máximo de 18,91 millones, con una media de 14,84 millones. En el caso de las grandes avenidas, los impactos irían de los 12,75 a los 29,77 millones, con una media de 21,21 millones. En un escenario de cambio climático, el promedio estimado para las avenidas menores sería de los 17,25 millones de euros (mínimo 11,22 millones y máximo de 22,61 millones), lo cual supone un incremento del 16,2% respecto a los algo más de 14 millones mencionados en el escenario base. Los sucesos extremos (periodo de 500 años) en este escenario acarrearían costes de entre 16,49 y 35,45 millones de euros, con un promedio de 24,73 millones. El cambio porcentual medio en los sucesos extremos sería del 16,6%. Tomados los distintos escenarios, es posible dibujar la curva de probabilidad-daño que a su vez permitiría una estimación del daño anual esperado. Este sería, según el estudio, de 56.097 euros en el escenario base (utilizando la estimación media), alcanzando los 64.451 euros en un escenario de cambio climático, lo cual supone un aumento de los daños del 14,9%.

3.3. El río Urola

Descripción

A lo largo de su cuenca, el río Urola transcurre por siete municipios guipuzcoanos. El recorrido que realiza es de 55 kilómetros y su cuenca se extiende por 337 km². El estudio de Osés-Eraso (2009) se centra en los efectos de las potenciales inundaciones en las áreas urbanas de los siete municipios que atraviesa el cauce. Este río presenta una importante variabilidad entre distintas estaciones, siendo el caudal alto en invierno y primavera y bajo en verano, si bien su caudal también varía según el segmento del recorrido.

Los estudios hidrográficos empleados en el estudio fueron realizados por el Gobierno Vasco a través del programa HEC-RAS. El estudio utilizó, además, información geográfica provista por el proyecto UDALPLAN, también desarrollado por el Gobierno Vasco, así como información demográfica de EUSTAT, con el objetivo de identificar propiedades e individuos en riesgo ante eventos de distinta magnitud y periodo de retorno, en concreto 10, 100 y 500 años. El análisis de los daños potenciales realizado por este estudio dividió la evaluación de impactos en cuatro grupos que englobaban un total de nueve tipos de impactos (a-i). El primero de estos grupos contiene los impactos directos en la propiedad. En este apartado se incluyen daños en (a) las propiedades residenciales y (b) no residenciales, así como (c) daños en el patrimonio cultural. En el segundo grupo, el estudio incluye los impactos indirectos en la propiedad, diferenciando también entre (d) propiedad residencial y (e) no residencial, pero excluyendo el patrimonio cultural. El tercer apartado corresponde a los impactos en la salud, entre los que se incluyen, por un lado, (f) muertos y heridos y, por otro, (g) la ansiedad provocada por un evento traumático como puede llegar a ser una inundación. Finalmente, en cuarto lugar, se nombran otros impactos, entre los que se encontrarían (h) los costes de emergencias y (i) los efectos de segundo orden, en este caso las interrupciones en el funcionamiento de la economía de la zona. Esta clasificación sirve para abordar desde un punto de vista práctico el asunto de la cuantificación de los posibles perjuicios causados por el evento, basándose en cierta medida en la clasificación bidimensional de daños directos/indirectos y tangibles/intangibles vista anteriormente.

El estudio construye distintos escenarios para analizar la evolución del riesgo a través de dos dimensiones, la socioeconómica, y la climática. La dimensión socioeconómica incluye aspectos como la densidad poblacional o la concentración de áreas industriales en las riberas fluviales o zonas costeras. Para el escenario climático, se emplearon modelos de predicción climática para anticipar los efectos que tendrá el cambio climático sobre el riesgo de inundación en la zona.

Principales resultados

En el estudio se identifican diferentes tendencias en el riesgo observado entre los distintos municipios. La principal ventaja de ir más allá de la noción de daño anual esperado es poder observar que, aun presentando datos similares en cuanto a daño esperado, la forma que adquieren las curvas puede variar notoriamente. Esto implica que, ante un riesgo anual esperado igual, una localidad puede sufrir más por avenidas poco frecuentes pero muy dañinas mientras que otra puede sufrir las consecuencias de mayores daños más regulares. Las implicaciones son claras: las medidas de prevención y protección a tomar difieren en cada municipio.

Los datos más interesantes del estudio son los que comparan los tres escenarios considerados, un resumen de los cuales aparece en el cuadro nº 3. Al analizar el segundo de los escenarios, el que considera los cambios en la estructura socioeconómica de la cuenca del río Urola, el estudio empleó proyecciones de variables de población, vivienda y actividades económicas, las cuales permiten identificar con

relativa precisión cambios en los elementos en riesgo ante una eventual riada (Osés-Eraso, 2008). El aumento del daño anual esperado por inundación según el análisis sería del 2,73% en la cuenca hidrológica. El estudio asigna diferentes incrementos a los distintos municipios que rodean el río y considera que este pequeño aumento en el riesgo es debido al alto nivel de urbanización actual, el cual ocupa gran parte del área inundable y limita la aparición de nuevos elementos en las zonas de riesgo.

Cuadro nº 3. DAÑO ANUAL ESPERADO (DAE) EN LA CUENCA DEL RÍO UROLA. CAMBIOS SOCIOECONÓMICOS Y CAMBIO CLIMÁTICO

Escenario	DAE (€2005)	% cambio
Base	83.329	
Base proyectado	85.604	2,73%
Climático	139.994	63,54%

Fuente: Elaboración propia.

El tercer escenario planteado es el climático. De nuevo, los efectos de estos cambios variaban entre municipios, pese a que el multiplicador de probabilidad empleado fuera el mismo. Mientras que en algunos de los municipios el aumento en el daño anual esperado sería relativamente bajo (en torno al 24% en municipios como Azkoitia y Zumárraga); en otros el aumento del riesgo sería mucho mayor, en torno al 65% en Legazpi, e incluso el riesgo podría aumentar un 100% como en el caso de Urretxu, con respecto al escenario base proyectado. Este contraste se debe a la diferencia entre las curvas de probabilidad-riesgo de los distintos municipios: aquellos que se vieran más afectados por avenidas más extremas se llevarían la peor parte debido al aumento en la probabilidad de estas, mientras que aquellas afectadas proporcionalmente más por las avenidas frecuentes mantendrían en cierto modo sus niveles de daño. En media, la cuenca podría experimentar un incremento del riesgo medido en DAE del 63%.

3.4. El caso de la costa vasca

Descripción

Los estudios no solo se centran en cuencas fluviales, sino que también abarcan los impactos generados por un posible aumento del nivel del mar. El estudio de Galarraga *et al.* (2011) analiza la región de la costa vasca en su conjunto. Este litoral ocupa un total de 246 km y podría observar un incremento en el nivel del mar de entre 28,5 y 48,7 cm según las estimaciones citadas por los autores (Chust *et al.*, 2010) de acuerdo con los escenarios A1B y A2 del IPCC. Los impactos que causaría este fenómeno abarcarían distintas áreas, entre ellas, la inundación de zonas costeras y humedales, la pérdida de hábitats, la salinización de acuíferos y suelos o la erosión. En este caso, la metodología empleada consta de cuatro fases: (I) Identificación de las distintas áreas susceptibles de sufrir una inundación; (II) Proyección de estas áreas; (III) Categoriza-

ción de los servicios de ecosistema; (IV) Estimación y monetización de los daños. El estudio empleó modelos de terreno digitales (DTM) a partir de imágenes LIDAR (Light Detection y Ranging). Para estimar los daños a largo plazo, se calculó el valor presente de los daños que generarían las aguas en las zonas a analizar.

La primera área de riesgo de la que se habla en el análisis es la de los ecosistemas dunares. Se trata de uno de los hábitats de mayor valor ambiental en el entorno del País Vasco y de los que mayor presión antrópica sufren (Sainz de Murieta, 2011). Para su valoración se utilizaron los costes de recuperación y de restauración, atendiendo a los costes previstos para la zona dunar de Urdaibai. Por otra parte, las zonas de costa con acantilados y zonas rocosas supralitorales fueron valorados también mediante costes de restauración y recuperación (Galarraga *et al.*, 2004), pero añadiendo los valores de uso pasivo (Ramos, Longo y Markandya, 2009) con la referencia esta vez de la zona costera de Jaizkibel. En cuanto a los humedales, cuyos servicios como ecosistema son especialmente amplios (Barbier, Acreman y Knowler, 1997), su valoración se realizó utilizando tanto los costes de restauración como valores de no mercado. La última posibilidad considerada fue la de los hábitats terrestres tales como bosques de ribera que acompañan a los humedales. Estos fueron evaluados a través de sus valores de uso pasivo (Ramos, Longo y Markandya, 2009), actividades recreativas y su capacidad de captura de carbono.

Principales resultados

El estudio analizado estimó que para el año 2100 este fenómeno provoque un coste de entre 87 y 231 millones de euros (euros de 2005 y empleando una tasa de descuento del 2%). Para este cálculo se han empleado valores de uso y no uso. El uso de valores de restauración implicaría un significativo descenso de la valoración de los entornos dañados, ya que, por norma general, la restauración de un elemento implica un valor menor al que se le otorga dejando la cifra de daños en casi 1,9 millones de euros.

Los autores también miden el cambio en los resultados que propiciaría un enfoque más ético en el que el peso de las generaciones futuras fuera mayor. Para ello repiten el cálculo en base a una tasa de descuento del 1% (Wheater y Evans, 2009). En este caso, el resultado crecería también de manera notoria, pasando a un intervalo de entre 214 y 565 millones de euros (euros de 2005) de daño. Los autores advierten que esta estimación puede llegar a considerarse conservadora al estar basada en los daños calculados en el estudio de Galarraga *et al.* (2004), que, por sus características, no incluía daños a muy largo plazo o pérdidas irremediables.

Existen asimismo estudios alternativos, entre los que se puede destacar el descrito por Méndez *et al.* (2004), que ofrece datos sobre el conjunto de la costa española. Los autores dividen la costa española (incluida la insular) en 12 zonas según las características más relevantes y calculan los efectos de los potenciales cambios sobre playas, estuarios, ecosistemas dunares y obras marítimas. El estudio busca un objetivo triple: evaluar los cambios en la dinámica costera española, evaluar los efectos del cambio climático en el litoral, y acercarse a políticas y estrategias frente al cambio climático.

3.5. La apertura del canal de Deusto en Bilbao

Descripción

Este análisis fue realizado en el contexto de la apertura del canal de Deusto en Bilbao que convirtió la península de Zorrozaurre en una isla, con el consiguiente impacto hidrológico en la ría de Bilbao (Osés-Eraso, Foudi y Galarraga, 2012). Según los resultados preliminares, este cambio en la estructura hidrográfica reduciría considerablemente las pérdidas económicas generadas por inundaciones en la capital vizcaína. El escenario inicial planteado es el de una apertura de 50 metros en el istmo, aunque para la realización del estudio se plantearon distintos anchos de apertura del canal. La división de los tipos de daño realizada en este estudio se asemeja a la realizada en Osés-Eraso (2009) y en el análisis fluvial en Galarraga *et al.* (2011), dividiendo entre daños a la propiedad residencial, propiedad no residencial, al patrimonio cultural, a la salud humana y un quinto grupo que agruparía «otros daños».

Principales resultados

En el caso de Bilbao, el estudio realiza una comparación entre el escenario base y la medida de reducción de riesgo planteada: la apertura de un tramo de canal que conectaría el canal de Deusto con el curso principal de la ría de Bilbao. El estudio basa su análisis en estudios hidráulicos disponibles para tres tipos de avenidas: 10, 100 y 500 años. Además, para cada escenario propone un rango de estimaciones, alto-bajo, en cada caso.

En el escenario base, los daños en el caso de avenidas frecuentes (10 años) oscilaría entre los 5,53 y los 6,84 millones de euros (IHOBE, 2007). Para avenidas medianas (100 años), las estimaciones de daños van de los 241,34 a los 294,43 millones de euros. En el caso de eventos extremos (retornos de 500 años), los daños podrían ser de entre 444,3 y 538,24 millones de euros. A partir de estas probabilidades y daños se pueden extrapolar las curvas de riesgos, con las que a su vez se obtendrían las estimaciones de daño anual esperado. En este caso se calcularon también dos casos de daños anual esperados, en base a la estimación baja y alta, e irían de los 225,1 a los 275,6 millones de euros.

La siguiente parte del estudio analiza las consecuencias, partiendo del escenario base, de la conversión de la península de Zorrozaurre en una isla. Para obtener la variación en el riesgo, el estudio considera la variación en las características hidrológicas generadas. Emplean la estimación de una reducción en la altura de la lámina de agua de entre 0,7 y 1,07 m. Se asume, por un lado, que la variación es el punto medio entre ambas estimaciones: 0,885 m, y, por otro lado, que esta apertura no modificaría la velocidad del agua en las distintas secciones del cauce. Los resultados son contundentes: para avenidas menores (retorno de 10 años), los daños desaparecen tanto en estimaciones altas como en bajas; para retornos de 100 años, los daños pasarían a reducirse, en la estimación más conservadora, de 241,34 a 78,62 millones de euros, lo cual significa una reducción del 67,42%; y para las avenidas más severas (500 años de retorno), pasarían de generar unas pérdidas de 444,3 a 307,91 millones de euros, o lo que es lo mismo, se verían reducidas en un 30,7%. Tras calcular las curvas de probabilidad-da-

ño, el valor aproximado del daño anual esperado oscilaría ahora entre los 11,028 y los 14,165 millones de euros. Para ambos escenarios la reducción rondaría el 95%.

4. **DISCUSIÓN SOBRE LOS RETOS DE LA VALORACIÓN DEL RIESGO Y EVALUACIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN**

Si bien el enfoque que se plantea del riesgo es eminentemente cuantitativo, existen cuestiones que requieren del análisis a largo plazo, y el desarrollo de medidas de prevención de riesgos se encuentra entre ellas, más aún cuando se plantean como medidas de adaptación al cambio climático, puesto que responderían a unos niveles de riesgo cambiantes. Algunas de estas cuestiones son planteadas en Galarraga *et al.* (2011), basándose a su vez en Markandya y Watkiss (2009).

Los estudios analizados presentan ciertos paralelismos, particularmente en cuanto a metodologías. Uno de los principales asuntos a tener en cuenta es el cómo contabilizar los daños. Esta cuestión puede resultar menor a la hora de estimar los daños sobre bienes intercambiables en mercados, como pueden ser vehículos, bienes inmuebles, etc. (Cuadro nº 1). Sin embargo, las diferencias en metodologías de valoración de bienes no intercambiables en los mercados pueden afectar a los resultados finales. A pesar de ello, la estimación de los daños debe ser lo más exhaustiva posible, ya que de ello también depende la precisión del análisis. Las potenciales distorsiones causadas por la selección de periodos de retorno son menores, si bien deben ser consideradas. Los estudios toman periodos de retorno de hasta 500 años, con un retorno mínimo de 5 años. El uso de una mayor cantidad de periodos de retorno (en este caso los estudios usan tres o seis periodos) ofrece mayor precisión en los análisis.

El análisis se sustenta sobre dos pilares: la amenaza (determinada por las condiciones climáticas) y la vulnerabilidad (determinada por las condiciones socioeconómicas). Ambas variables presentan incertidumbre en el largo plazo. De ahí la necesidad de desarrollar modelos que ofrezcan escenarios socioeconómicos y climáticos capaces de reducir estas incertidumbres. Si bien tres de los estudios tienen en cuenta los escenarios futuros de cambio climático, tan solo uno tiene el objetivo de analizar una medida de adaptación a este, a través de la estimación de los costes derivados de la acción frente a los costes esperados en caso de inacción.

Quizás la consideración más importante es la preferencia por la inmediatez. Por norma general, los beneficios presentes son valorados más que los futuros, de la misma manera que los costes futuros generan menor perjuicio que los presentes. La tasa de descuento es la herramienta económica utilizada para introducir esta consideración dentro de los cálculos a realizar. Sin embargo, la cuantificación de una tasa de descuento es compleja debido a cuestiones morales, tales como dar más peso al bienestar de las generaciones futuras, ya que esto implicaría reducir el tipo de interés a aplicar, mientras que una ponderación mayor del bienestar presente implicaría una tasa de descuento mayor. Puede parecer que este desacuerdo no tiene influencia, pero no debemos olvidar que estamos haciendo referencia a crecimientos exponenciales a lo largo de periodos de tiempo que superan habitualmente los 50 años para una inversión.

La diferencia puede ser tal que estudios sobre un mismo tema pueden arrojar conclusiones opuestas tras un cambio aparentemente pequeño en la tasa de descuento. Con el fin de integrar esas consideraciones intergeneracionales, la tasa de descuento de las inversiones públicas puede llegar a tener una estructura decreciente con el tiempo, como se ilustra en Groom (2014). Así, en el Reino Unido la tasa de descuento es de 3,5% hasta 50 años y decrece por tramos hasta llegar al 1% para proyectos a 300 años. En Francia, en cambio, es de 4% hasta 30 años y fija a 2% encima de 30 años.

Por otro lado, existen diversas formas de incertidumbre. La incertidumbre afecta a las predicciones sobre el cambio climático no solo de forma directa, al ser complicado determinar de manera precisa los efectos del cambio climático sobre determinado escenario, sino también, por ejemplo, al afectar a cuestiones como el desarrollo económico o demográfico de una región. La incertidumbre existe además a varios niveles. Todos los modelos analizados se basan en escenarios probabilísticos, ya que la predicción de eventos, como las inundaciones, no es posible salvo a muy corto plazo. Es por ello necesaria la construcción de este tipo de modelos que ayuden a tomar medidas de prevención (Weitzman, 2007). La incertidumbre también afecta a los escenarios base, al ser estimaciones de los cambios en la población, economía o comportamiento, entre otros.

La reversibilidad, flexibilidad y gestión adaptativa también pueden ser factores relevantes a la hora de analizar las dinámicas de riesgo y adaptación. Determinadas medidas llevadas a cabo para reducir el riesgo pueden resultar erróneas o dejar de ser útiles en determinadas circunstancias. Por ello, aquellas medidas más fácilmente reversibles o flexibles pueden generar mejores beneficios. En este contexto, algunas medidas son clasificadas como «*no-regret measures*», aquellas que, aun en caso de no resultar útiles, tampoco resultan inconvenientes. Muchas de estas medidas «*no-regret*» pertenecen a las denominadas medidas de adaptación blandas, que se definen en contraposición a las medidas duras de adaptación, las cuales guardan relación con los cambios en la estructura física del entorno, mientras las segundas se refieren a cambios en los comportamientos de los individuos. Estas medidas de adaptación generan también, en ocasiones, beneficios sobrevenidos o co-beneficios, esto es, beneficios asociados a medidas de adaptación que no son los principales objetivos de la medida en sí.

También es necesario considerar los impactos en la economía y las relaciones intersectoriales. En este caso, esta cuestión surge de los impactos directos, indirectos e inducidos, que pueden reflejarse en otros sectores, tal y como recogen los modelos de equilibrio general o las tablas *input-output*. Asimismo, las cuestiones redistributivas también deben ser consideradas. Por una parte, es previsible que el impacto del cambio climático afecte con más severidad a las poblaciones empobrecidas, pero también es importante tener en cuenta que el coste de determinadas medidas de adaptación puede recaer de manera desproporcionada sobre los mismos grupos.

Otra cuestión recurrente es la necesidad de mezclar evaluaciones monetarias y no monetarias. Esta combinación hace que los análisis coste-beneficio resulten más complejos y limitados, a lo que se debe añadir asuntos como la disponibilidad de información o la distribución de impactos (Galarraga *et al.*, 2011). Por ello, algunos

estudios consideran la opción de incorporar análisis basados en otras metodologías, tales como el coste eficacia, el enfoque de riesgo o multicriterio.

Las medidas de mitigación deben ser diferenciadas, asimismo, de las de adaptación. Aunque la relación entre ambos conceptos no sea tan sencilla como pudiera parecer en un primer momento, la diferencia debe permanecer clara en todo análisis. Uno de los motivos es la posibilidad de que las medidas de adaptación tengan un efecto en las emisiones, con lo que al mismo tiempo ayudarían a la adaptación y contravendrían la mitigación.

Por último, la estimación de la eficiencia de cada una de las medidas preventivas del riesgo de inundación antes de su ejecución, si bien es necesaria, es un trabajo minucioso y costoso en términos de recursos. La transferencia o extrapolación de unos estudios geográficos a otras áreas puede resultar atractiva, pero tendrá un margen de error significativo. De los elementos necesarios para llegar a una estimación del riesgo y de daños evitados por una medida de adaptación, se ha demostrado por medio de análisis de sensibilidad que son las funciones de daños que proporcionan la mayor fuente de incertidumbre en la valoración del riesgo de inundación (De Moel y Aerts, 2011; De Moel *et al.*, 2012; Saint-Geours *et al.*, 2013). Un estudio de Castillo-Rodríguez *et al.* (2016) ilustra con un caso de estudio en el sureste de España que los daños por unidad de superficie pueden variar de un factor 5 a 40 según la función de daños calibrada en diferentes sectores de la economía.

5. CONCLUSIONES

El riesgo derivado de inundaciones es significativo y cabe esperar que se incremente por efecto de los cambios económicos, sociales y demográficos, así como por efecto del cambio climático. De ahí la importancia de las medidas preventivas. El paso previo a la toma de decisiones es la identificación de los riesgos derivados de las inundaciones. Los estudios analizados suponen un gran paso a la hora de encontrar la información necesaria. Sin embargo, existe la necesidad de continuar las investigaciones que lleven a una identificación de los riesgos si no óptima, al menos suficiente.

Los impactos derivados de las inundaciones pueden adoptar distintas formas y pueden ser clasificados de distintos modos. La más habitual distingue entre daños directos/indirectos y tangibles/intangibles. No obstante, para recalcar la amplitud de los perjuicios que generan eventos de este tipo, podemos clasificar los daños en los generados en activos, los que afectan a la actividad económica, los que crean perjuicios a la salud de las personas y los daños en el medioambiente. Estos daños tenderán a crecer según las predicciones de los modelos expuestos en este trabajo. El cambio climático no será la única fuerza que contribuya a esto. Una buena parte de la población mundial reside en entornos susceptibles de padecer un evento extremo de este tipo, bien por encontrarse en entornos fluviales, bien al situarse cerca de la costa. Nada indica que esta tendencia vaya a revertirse, si acaso, la tendencia podría llevar a acentuar este fenómeno (Travers *et al.*, 2012). La concentración de personas y activos en áreas urbanas protege a los individuos y a su capacidad productiva, pero

también implica un potencial riesgo de catástrofe una vez que un evento extremo alcanza un área densamente poblada. Existen, por lo tanto, dos fuerzas contrapuestas: por una parte, el desarrollo económico, que reduce la vulnerabilidad de aquellas personas y bienes expuestas a inundaciones; y por otra parte, el aumento de individuos y activos expuestos a eventos peligrosos en todo el mundo.

Las herramientas empleadas en los estudios analizados no son las únicas que han sido concebidas por los expertos para afrontar el problema de las inundaciones. Como cualquier modelo, estos mecanismos no están exentos de problemas y cuestiones a tener en cuenta. Si bien no es el más importante, un problema que destaca por estar en la base de la modelización, es la definición de lo que es un desastre, un evento catastrófico y otros conceptos del mismo campo semántico (Okuyama y Sahin, 2009; Hallegatte y Przyluski, 2010). Pese a que los modelos analizados abarquen desde sucesos muy frecuentes, y que pueden incluso no generar ningún daño, hasta aquellos cuya capacidad destructiva es total, es a menudo necesario buscar los puntos de inflexión de los que depende la toma de decisiones. Se trata de puntos donde la percepción del riesgo puede cambiar abruptamente pese a que el cambio en el riesgo real sea constante. Dicho con otras palabras, la aversión hacia los eventos extremos contrasta con la relativa indiferencia frente a daños fáciles de anticipar, situación que resulta de gran importancia a la hora de diseñar políticas.

El segundo problema a destacar es el de la incertidumbre, al radicar en el núcleo del modelo, ya que lo que se busca es precisamente afrontar los problemas derivados de situaciones inciertas que causen daños a la sociedad. Existen dos fuentes de incertidumbre (Qi, Qi, y Altinakar, 2013). Por una parte, se encuentra la incertidumbre que trata de solventar el modelo, es decir, el desconocimiento sobre los procesos que desembocan en inundaciones, como la variabilidad natural en las lluvias, y que imposibilitan la predicción exacta del momento y de la intensidad de un evento del tipo analizado. Por otra parte, a esta incertidumbre se le añade una variedad que Qi, Qi, y Altinakar (2013) denominan «epistémica», y que se debe a la imposibilidad de abarcar todos los datos necesarios y así construir un modelo que describa con exactitud los procesos físicos relacionados con inundaciones.

Sin embargo, aún sigue siendo necesario profundizar en la investigación en varios frentes. Posiblemente el más valioso sea avanzar en la construcción de modelos climáticos, tanto globales como locales, que permitan identificar, con la mayor precisión posible, los efectos del cambio climático sobre las variables meteorológicas más importantes, entre las que se encuentran las relacionadas con las precipitaciones. La capacidad de predecir los cambios económicos, demográficos y sociales queda fuera del alcance de la investigación actual, lo cual no quiere decir que no exista cierto espacio para una mejora que aumente la precisión de las predicciones. Otro foco de mejora se encuentra en la evaluación de los daños potenciales. Aunque se ha escrito mucho en este sentido, es evidente que existe aún espacio para la mejora debido a la dificultad para la valoración de activos intangibles, que incluye aspectos de tremenda importancia, tales como los servicios de los ecosistemas o la salud humana.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AYALA CARCEDO, F.J. (2002): «El Sofisma de la imprevisibilidad de las inundaciones y la responsabilidad social de los expertos: Un análisis del caso español y sus alternativas», *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 33: 79-92. <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1122434&info=resumen&idioma=SPA>
- BALBI, S.; GIUPPONI, C.; OLSCHESKI, R.; MOJTAEH, V. (2013): «The economics of hydro-meteorological disasters: approaching the estimation of the total costs», BC3 Working Paper Series 2013-12. Bilbao. <http://papers.ssrn.com/abstract=2317437> http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2317437
- BARBIER, E.B.; ACREMAN, M.; KNOWLER, D. (1997): «Economic valuation of wetlands - A guide for policy makers and planners», Ramsar Convention Bureau, Gland. <https://www.researchgate.net/publication/246010067>
- CASTILLO-RODRÍGUEZ, J.T.; ESCUDER-BUENO, I.; PERALES-MOMPARLER, S.; PORTA-SANCHO, J.R. (2016): «Enhancing local action planning through quantitative flood risk analysis: a case study in Spain», *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 16: 1699-1718. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1699-2016>
- CE (2007): «Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo», Bruselas.
- CHUST, G.; CABALLERO, A.; MARCOS, M.; LIRIA, P.; HERNANDEZ C.; BORJA, A. (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
- CONSORCIO DE COMPENSACIÓN DE SEGUROS (2019): «Estadística Riesgos Extraordinarios-Serie 1971-2018», Consorcio de Compensación de Seguros, Madrid. http://www.consors-seguros.es/web/documents/10184/44193/Estadistica_Riesgos_Extraordinarios_1971_2014/14ca6778-2081-4060-a86d-728d9a17c522
- DE MOEL, H.; AERTS, J.C.J.H. (2011): «Effect of uncertainty in land use, damage models and inundation depth on flood damage estimates», *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 58: 407-425.
- DE MOEL, H.; ASSELMAN, N., AERTS, J. C. J. H. (2012): «Uncertainty and sensitivity analysis of coastal flood damage estimates in the west of the Netherlands», *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12: 1045-1058.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2011): «Disasters in Europe: More frequent and causing more damage», European Environment Agency. Copenhagen. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-0974-8>
- FOUDI, S.; OSÉS-ERASO, N. (2014): «Flood risk management: assessment for prevention with hydro-economic approaches», en Markandya, A., Galarraga, I., Sainz de Murieta, E. (eds.), *Routledge Handbook of the Economics of Climate Change Adaptation (Hardback)*, Routledge, London & New York.
- FOUDI, S.; OSÉS-ERASO, N.; TAMAYO, I. (2015): «Integrated spatial flood risk assessment: The case of Zaragoza», *Land Use Policy*, 42: 278-292. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.08.002>
- GALARRAGA, I.; MARTÍN LANDA, I.; BERISTAIN ETXABE, I.; BOTO BASTEGIETA, A. (2004): «El método de transferencia de valor (benefit transfer), una segunda opción para la evaluación de impactos económicos», *Economiaz*, 57: 30-45.
- GALARRAGA, I.; OSÉS-ERASO, N.; MARKANDYA, A.; CHIABAI, A.; KHATUN, K. (2011): «Aportaciones desde la economía de la adaptación a la toma de decisiones sobre cambio climático: Un ejemplo para la Comunidad Autónoma Del País Vasco», *Economía agraria y recursos naturales*, 11: 113-42.
- GARCÍA CORDÓN, J. (2004): «Las ciudades españolas y el riesgo de inundación: Permanencia y cambio de un problema crónico», *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 37: 85-100.
- GROOM, B. (2014): «Discounting», en: Markandya, A., Galarraga, I., Sainz de Murieta, E. (eds.), *Routledge Handbook of the Economics of Climate Change Adaptation (Hardback)*, Routledge, London & New York.
- HALLEGATTE, S.; PRZYLUKI, V. (2010): «The economics of natural disasters concepts and methods», Policy Research Working Paper 5507, Washington. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-073009-104211>
- HOYOS, D.; LONGO, A.; MARKANDYA, A. (2009): «Concienciación pública y aceptabilidad de medidas para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero: El caso del País

- Vasco», *Papeles de Economía Española* 21 (121): 68–78. <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3063039>.
- IHOBE (2007): «Metodología para valorar los costes de los impactos del cambio climático», IHOBE, Bilbao.
- KRON, W. (2002): «Flood risk=hazard x exposure x vulnerability», en Wu, B.S.; Wang, Wang, G.Q.; Huang, G. H.; Fan, H.W.; Huang, J.C. (eds.) *Flood defence*, Science Press, New York.
- KUNDZEWICZ, Z.W.; SCHELLNHUBER, H.J. (2004): «Floods in the IPCC TAR Perspective», *Natural Hazards* 31(1): 111–28. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000020257.09228.7b>.
- MARKANDYA, A.; WATKISS, P. (2009): «Potential costs and benefits of adaptation options: a review of existing literature», Technical Paper UNFCCC. <http://unfccc.int/resource/docs/2009/tp/02.pdf>.
- MÉNDEZ, F.J.; MEDINA, R.; LOSADA, I.J.; OLABARRIETA, M.; TOMÁS, A.; LISTE, M.; MENÉNDEZ, M.; ABASCAL, A.J.; AGUDELO, P.; CASTANEDO, S. (2004): «Materia de investigación sobre impactos en la costa española por efecto del cambio climático», en García Codron, J. C., Diego Liaño, C., Fdez. de Arróyabe Hernández, P., Garmendia Pedraja, C. y Rasilla Álvarez, D. (eds.) *El Clima Entre El Mar y La Montaña*, Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria, Santander. http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/fase3_costas_tcm7-12443.pdf.
- MESSNER, F.; MEYER, V. (2005): «Flood damage, vulnerability and risk perception-challenges for flood damage research», UFZ Discussion Papers 13/2005, Leipzig.
- OKUYAMA Y.; SAHIN S. (2009): «Impact estimation of disasters: a global aggregate for 1960 to 2007», World Bank Policy Research Working Papers, 4963, 1–42, Washington.
- OSÉS-ERASO, N. (2008): «Costes del cambio climático: riesgo de inundación en la Cuenca del río Urola», Documento de Trabajo elaborado para IHOBE, Bilbao.
- (2009): «Costes Del Cambio Climático En El País Vasco Por Riesgo de Inundación», *Ekonomiaz*, 71 (2): 62–83.
- OSÉS-ERASO, N.; FOUADI, S.; GALARRAGA, I. (2012): «Análisis del impacto socio económico del daño por inundación en la Ría de Nervión», Basque Centre for Climate Change (BC3), Bilbao.
- PARRY, M.L.; CANZIANI, O.F.; PALUTIKOF, J.P.; VAN DER LINDEN, P.J.; HANSON, C.E. (2007): «Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change», *International Journal of Climatology*. Cambridge. <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0015br>.
- PENNING-ROWSELL, E.; JOHNSON, C.; TUNSTALL, S.; TAPSELL, S.; MORRIS, J.; CHATTERTON, J.; GREEN, C. (2005): «The benefits of flood and coastal risk management: A handbook of assessment techniques», Middlesex University Press, London.
- QI, H.; QI, P.; ALTINAKAR, M.S. (2013): «GIS-based spatial Monte Carlo analysis for integrated flood management with two dimensional flood simulation», *Water Resources Management*, 27 (10): 3631–45. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0370-8>.
- SAINT-GEOURS, N.; LAVERGNE, C.; BAILLY, J.S.; GRELOT, F. (2013): «Ranking sources of uncertainty in flood damage modelling: a case-study on the cost-benefit analysis of a flood mitigation project in the Orb Delta, France», *Journal of Flood Risk Management*, 8:161–176 DOI: 10.1111/jfr3.12068
- SAINZ DE MURIETA, E. (2011): «Reconstrucción paleoambiental a partir del registro geológico en las marismas de Urdaibai: Cambios en el nivel del mar», *CQK Quaternary Studies* 1 (1): 171–81. <https://www.researchgate.net/publication/233740265>.
- SCHANZE, J. (2006): «Flood risk management. A basic framework», en Schanze, J., Zeman, E. y Marsalek, J. (Eds.) *Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures*. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4598-1_1.
- TRAVERS, A.; ELRICK, C.; KAY, R.; VESTERGAARD, O. (2012): «Ecosystem-based adaptation guidance: moving from principles to practice», United Nations Environment Programme, Nairobi.
- WEITZMAN, M.L. (2007): «A review of the stern review on the economics of climate change», *Journal of Economic Literature*, 45 (2): 703–724.
- WHEATER, H.; EVANS, E. (2009): «Land use, water management and future flood risk», *Land Use Policy*, 26: (SUPPL. 1). <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.08.019>.

¿Para qué impactos climáticos se preparan las ciudades españolas?

What climatic impacts are Spanish cities preparing for?

Las ciudades tienen un papel importante en la identificación de impactos climáticos sobre la población, la urbanización y las infraestructuras, y en la toma de decisiones relativas a cómo, cuánto y cuándo debemos adaptarnos. Presentamos aquí un análisis de los impactos climáticos identificados en 11 planes de adaptación local al cambio climático actualmente en vigor en las mayores ciudades españolas. Categorizamos estos impactos climáticos en torno a 7 amenazas climáticas: aumento del nivel del mar, oleaje extremo, precipitación intensa, descenso de las precipitaciones, aumento de las temperaturas, olas de calor y vendavales. Discutimos los resultados, limitaciones y oportunidades en este tipo de evaluaciones, y proponemos áreas de mejora en la práctica de la evaluación de impactos y planificación de la adaptación local al cambio climático.

Hiriek zeregin garrantzitsua dute biztanleriaren, urbanizazioaren eta azpiegituren gaineko inpaktu klimatikoak identifikatzeko, baina baita nola, zenbat eta noiz egokitu behar dugun erabakitzeko ere. Gaur egun Espainiako hiri handienetan indarrean dauden klima-aldaketara egokitzeko tokiko 11 planetan identifikatutako klima-inpaktuen azterketa aurkezten dugu hemen. Klima-inpaktu horiek 7 klima-mehatxuren inguruan sailkatzen ditugu: itsas mailaren igoera, muturreko olatuak, prezipitazio handia, prezipitazioen jaitsiera, tenperaturen igoera, bero-boladak eta haizeteak. Ebaluazio mota horien emaitzak, mugak eta aukerak eztabaidatzen ditugu, eta hobetu beharreko arloak proposatzen ditugu inpaktuen ebaluazioan eta klima-aldaketarako tokiko egokitzapenaren plangintzan

Cities play an important role in identifying climate impacts on population, urbanization and infrastructure, and in making decisions regarding how, how much and when we should adapt. We present here an analysis of the climatic impacts identified in 11 local climate change adaptation plans which are currently in force in the largest Spanish cities. We categorize these climatic impacts around 7 climatic threats: sea-level rise, storm surges, intense rainfall, rainfall decrease, temperature increase, heatwaves and strong winds. We discuss the results, limitations and opportunities for these types of assessments, and propose improvement areas for both climate impact assessment and local climate change adaptation planning practice.

Índice

1. Introducción
2. Datos y métodos
3. Resultados y discusión
4. Conclusiones

Referencias bibliográficas

Anexo

Palabras clave: cambio climático, adaptación, política climática, política local, planificación urbana.

Keywords: climate change, adaptation, climatic policy, local politics, urban planning.

Nº de Clasificación JEL: Q53, R58, O21

Fecha de entrada: 09/03/2020

Fecha de aceptación: 12/05/2020

Agradecimientos: MO está financiada por el Gobierno de España (IJCI-2016-28835) y por AXA Research Fund (No. 4771). El desarrollo de este estudio también ha contado con el apoyo del Gobierno Vasco a través del programa BERC 2018-2021 y del Gobierno de España a través de la acreditación de BC3 como centro María de Maeztu (MDM-2017-0714).

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático conducirá a una mayor frecuencia, intensidad y/o duración de eventos climáticos extremos, tales como precipitación intensa, temperaturas extremas, olas de calor, sequías, tormentas y aumento del nivel del mar (Revi *et al.*, 2014). Se estima que los impactos del cambio climático, entendidos como el resultado (efectos sobre la vida, los medios de vida, la salud, los ecosistemas, economías, sociedades, culturas, servicios e infraestructura) de la interacción de los eventos climáticos con la vulnerabilidad y exposición de un sistema humano o natural (IPCC, 2014a), pueden ser especialmente importantes en las ciudades (Estrada *et al.*, 2017; Revi *et al.*, 2014), ya que es allí donde se concentra la población, servicios y bienes, infraestructuras críticas y ecosistemas con un papel relevante de regulación y protección. Además, la inercia de los procesos de urbanización en la línea de costa y en zonas inundables o proclives a sufrir impactos climáticos, causarán un aumento sustancial de los riesgos, unido a un incremento de los costos de prevención y recuperación de daños (Coalition for Urban Transitions, 2019; Defries *et al.*, 2019).

Si continúan los patrones actuales de urbanización y no se mejora o dota de mayor capacidad a la infraestructura existente, las áreas urbanas pueden volverse más susceptibles a las inundaciones y a la contaminación de las redes de suministro de agua en caso de que la infraestructura de alcantarillado y drenaje no pueda hacer frente a mayores volúmenes o inundaciones repentinas (Defries *et al.*, 2019). De igual manera, el aumento de temperaturas unido al llamado efecto de isla de calor urbana, generará un aumento de los impactos climáticos, tanto en la infraestructura como en los servicios y en la salud humana (Defries *et al.*, 2019; Estrada *et al.*, 2017; Revi *et al.*, 2014).

En la mayoría de los casos, los impactos del cambio climático se consideran factores potencialmente importantes en la toma de decisiones a medio y largo plazo, y se relacionan principalmente con patrones de inversión en desarrollo e infraestructura, sobre todo, con las estrategias de desarrollo socioeconómico a nivel de ciudad (Hunt & Watkiss, 2010). Por ello, el cambio climático es cada vez un criterio más importante en la planificación urbana y muchas ciudades a lo largo del mundo están desarrollando políticas específicas para prepararse ante sus impactos (Araos *et al.*, 2016; Olazabal *et al.*, 2019b).

Sin embargo, la estimación de los impactos del cambio climático es complicada en las ciudades por la dificultad de incorporar los procesos de planificación urbana en los modelos de cálculo (Defries *et al.*, 2019). Junto con las proyecciones socioeconómicas, los procesos de planificación son críticos a la hora de proyectar los futuros impactos y simular el desempeño de las medidas de actuación propuestas. En general, nuestro conocimiento sobre los impactos climáticos, cómo se relacionan estos entre sí y cómo se conectan, a su vez, con las actuaciones para adaptar los sistemas, es actualmente bastante escaso, sobre todo cuando nos referimos a territorios específicos, y especialmente cuando hablamos de la escala local. Por esta razón, las propias ciudades adquieren un papel muy relevante en cuanto a la identificación y valoración (cuantitativa o cualitativa) de impactos climáticos sobre la población, la urbanización y las infraestructuras (Revi *et al.*, 2014).

En el proceso de estimación de riesgos e impactos climáticos, las ciudades son actores críticos ya que tienen acceso a datos espaciales de población y bienes expuestos, como edificios, infraestructura y áreas protegidas (Aerts *et al.*, 2014), así como conocimiento de los efectos generados por impactos climáticos pasados y de las vulnerabilidades reflejadas en los diferentes sectores. Este tipo de información, además, es indispensable para evaluar los costes y beneficios de las actuaciones de adaptación propuestas (Abadie *et al.*, 2017; Estrada *et al.*, 2017). Por otra parte, la evaluación cualitativa de los efectos potenciales positivos y negativos del cambio climático a escala local puede ser de gran utilidad para desarrollar árboles de problemas que ayuden a establecer mapas de relaciones causa-efecto como base para la elaboración de estrategias de actuación (Feliu *et al.*, 2015).

De aquí, que la relevancia de las ciudades en la toma colectiva de decisiones relativa a cómo, cuánto y cuándo debemos adaptarnos sea innegable. Además, en los próximos 10 años se invertirán billones de dólares en el desarrollo de infraestructura urbana

y la población urbana global crecerá en casi mil millones de personas en el mismo período, lo cual hará que las decisiones tomadas a nivel urbano coloquen a los países en el camino hacia la prosperidad y la capacidad de recuperación, o el declive y la vulnerabilidad (Coalition for Urban Transitions, 2019). En este contexto, las regiones y países precisan de información a escala urbana para poder identificar necesidades de apoyo institucional, económico, regulatorio o ejecutivo y para evaluar posibles impactos intersectoriales, interurbanos o transregionales (Olazabal *et al.*, 2019a).

En los últimos años se han desarrollado estudios a escala global sobre impactos del cambio climático en ciudades (Abadie *et al.*, 2019; Anderson *et al.*, 2018; Estrada *et al.*, 2017; Hallegatte *et al.*, 2013), pero casi todos se centran en una determinada amenaza climática. La cuantificación de los impactos del cambio climático está más extendida para amenazas como la subida del nivel del mar (Abadie *et al.*, 2019), eventos costeros extremos (Abadie *et al.*, 2017), o los impactos en la salud debido a las temperaturas extremas (Estrada *et al.*, 2017). Pocos estudios hacen evaluaciones que tengan en consideración múltiples amenazas concatenadas o en el mismo periodo de tiempo (Diaz-Sarachaga & Jato-Espino, 2019; Forzieri *et al.*, 2016). La existencia de impactos climáticos intra- e inter- conectados (impactos indirectos y directos que suceden dentro del mismo sector o escala de gobernanza –intra– y a través de distintos sectores y escalas de gobernanza –inter–) constituye una de las razones más importantes para fortalecer la gobernanza de la adaptación climática (Persson, 2019), pero también es una de las razones por las cuales los modelos económicos actuales que estiman los impactos climáticos no reflejan la realidad absoluta (Defries *et al.*, 2019).

Necesitamos conocer y ser capaces de evaluar los impactos climáticos actuales y en distintos horizontes temporales para establecer medidas de actuación apropiadas en cada momento y para medir el progreso de la adaptación. En este sentido, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, en sus siglas en inglés) (Revi *et al.*, 2014) argumenta que para medir y monitorear el éxito en adaptación a escala local es necesario llevar una evaluación cuantitativa de los impactos del cambio climático y de su evolución.

En concreto, Europa verá un aumento progresivo y fuerte en la amenaza climática, sobre todo, en las regiones del sudoeste (Forzieri *et al.*, 2016). Los puntos más críticos están situados particularmente a lo largo de las costas y en las llanuras aluviales en el sur y el oeste de Europa, donde a menudo se concentra la población y recursos críticos en la economía europea (Forzieri *et al.*, 2016). Un análisis de los resultados del informe de la Red Europea de Observación de la Planificación del Territorio (ESPON *et al.*, 2011) concluye que las ciudades españolas tienen un grado de vulnerabilidad al cambio climático alto o muy alto comparado con otras ciudades europeas (De Gregorio Hurtado *et al.*, 2015; Olazabal *et al.*, 2014).

Con más del 75% de la población nacional viviendo en áreas urbanas, las ciudades españolas afrontan problemas asociados al desarrollo urbano que son agravados por los impactos del cambio climático (Feliu *et al.*, 2015). Es indispensable no solo tener

en cuenta los impactos climáticos que afecten de forma directa en las ciudades (por ejemplo, afecciones directas en la salud debido al aumento de temperaturas o los impactos del oleaje extremo y las inundaciones sobre la infraestructura), sino también los indirectos (tales como la pérdida de ecosistemas que proporcionan servicios básicos en las ciudades). Por ejemplo, se prevé una pérdida de humedales que protegen ciudades o asentamientos industriales debido a impactos de eventos extremos costeros y de la subida del nivel del mar (como es el caso de la desembocadura del Nervión en Bilbao, la ría de Avilés o la ría de Ferrol) (Losada *et al.*, 2014). Esta pérdida de servicios de los ecosistemas puede resultar en una disminución de la resiliencia de estos asentamientos ante el cambio climático. La evidencia sobre la progresiva reducción de los recursos hídricos y la sequía que sufrirá España (CEDEX / MAPAMA, 2017) y el aumento de temperaturas y olas de calor (Tobías *et al.*, 2014), también verán sus efectos en las áreas urbanas, así como en otros sectores clave para el funcionamiento de la ciudad (turismo, transporte, industria y energía, finanzas/seguros, la construcción y los propios procesos urbanos), en los cuales ya se prevén impactos potenciales del cambio climático (De la Colina *et al.*, 2019) que desembocarán en efectos significativos sobre el bienestar humano y sobre el desarrollo ambiental, económico y social.

En este contexto, y ante la falta de estudios exhaustivos de referencia sobre impactos climáticos en áreas urbanas españolas, es interesante estudiar en concreto para qué impactos climáticos se están preparando las ciudades españolas. En este estudio proponemos responder a esta pregunta analizando 11 planes de adaptación (más documentación asociada) en 11 ciudades españolas capitales de provincia. Examinando para qué impactos climáticos se están preparando las ciudades españolas a través de esta muestra, queremos conocer: a) el grado de evidencia y conocimiento de los impactos climáticos a nivel local; b) el nivel de detalle en la evaluación de impactos al que están llegando las ciudades; y c) las posibles oportunidades, carencias y limitaciones del estado de la cuestión a nivel práctico.

A continuación, se presentan los Datos y Métodos utilizados (apartado 2) seguido de los resultados y una discusión sobre aspectos transversales a tener en cuenta (apartado 3). Finalmente, extraemos una serie de recomendaciones y conclusiones fruto de este análisis.

2. DATOS Y MÉTODOS

En este estudio analizamos 11 planes de adaptación de ciudades españolas capitales de provincia junto con su documentación asociada (ver cuadro nº 1) identificados a través de varias iniciativas recientes (Reckien *et al.*, 2018; Sainz de Murieta *et al.*, 2020), los únicos existentes, tomando como muestra las 52 capitales de provincia españolas más las 2 ciudades autónomas (última actualización en junio de 2019). El método de identificación y colección de datos es el mismo utilizado originalmente en Reckien *et al.* (2014) que consiste, de manera resumida, en una búsqueda mediante un motor de Internet (Google) a través de palabras clave («cambio climático», «adaptación» y el nombre de la ciudad) y una verificación posterior con responsables de las autoridades locales.

Cuadro nº 1. DOCUMENTOS ANALIZADOS

Ciudades	Título del plan	Año publicación	Referencia
Córdoba	Plan Estratégico Municipal de Adaptación al Cambio Climático de Córdoba: MEDIDAS DE ACTUACIÓN.	2018	Ayuntamiento de Córdoba, 2018a
	Plan Estratégico Municipal de Adaptación al Cambio Climático de Córdoba: DIAGNÓSTICO II: VULNERABILIDADES.		Ayuntamiento de Córdoba, 2018b
	Plan Estratégico Municipal de Adaptación al Cambio Climático de Córdoba: DIAGNÓSTICO I: ESCENARIOS CLIMÁTICOS y AMENAZAS.		Ayuntamiento de Córdoba, 2018c
Guadalajara	Estrategia de Adaptación al Cambio Climático de Guadalajara.	2018	Ayuntamiento de Guadalajara, 2018
Barcelona	Plan Clima 2018-2030.	2018	Ayuntamiento de Barcelona, 2018
Girona	Pla d'Acció pel Clima i l'Energia Sostenible de Girona.	2017	Ajuntament de Girona, 2017
Lleida	Pla d'adaptació al Canvi Climàtic del Municipi de Lleida.	2015	Ajuntament de Lleida, 2015
Madrid	Plan de calidad del aire y cambio climático. Plan A.	2017 2015	Ayuntamiento de Madrid, 2017
	Análisis de Vulnerabilidad ante el Cambio Climático en la ciudad de Madrid.		Ayuntamiento de Madrid, 2015
Murcia	Estrategia de Adaptación al Cambio Climático del Municipio de Murcia a 2030.	2018	Ayuntamiento de Murcia, 2018
Vitoria-Gasteiz	Plan de Adaptación al Cambio Climático de Vitoria-Gasteiz. Etapa 1. Informe de resultados de las Fases I y II: Escenarios climáticos y análisis de la vulnerabilidad por sectores.	2011	Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz, 2011
	Estrategia de Adaptación al Cambio Climático de Vitoria-Gasteiz. Horizonte 2014-2020. Borrador.	No publicado	Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz, 2014
Donostia-San Sebastián	Plan de Adaptación al cambio climático de Donostia/San Sebastián. Entregable 1: Diagnóstico.	2017	Donostiako Udala / Ayuntamiento de San Sebastián, 2017a
	Plan de Adaptación al cambio climático de Donostia/San Sebastián. Entregable 2: Plan de Adaptación.		Donostiako Udala / Ayuntamiento de San Sebastián, 2017b
Valencia	Plan de Adaptación al Cambio Climático de Valencia 2050.	2017	Factor CO ₂ , 2017
Zaragoza	Estrategia de cambio climático, salud y calidad del aire Zaragoza - ECAZ3.0	2019	Ayuntamiento de Zaragoza, 2019

Fuente: Elaboración propia.

En el proceso de análisis de estos planes y documentos asociados (habitualmente documentos de diagnóstico que, en el caso de adaptación, corresponden a estudios previos sobre escenarios climáticos, vulnerabilidad, exposición y riesgo) identificamos los siguientes aspectos:

- Impactos del cambio climático por sector de actividad o área de gestión, siguiendo la terminología y aproximación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático en su último informe (IPCC, 2014a).
- Metodologías y procesos utilizados para la identificación de los impactos en cada uno de los casos, así como para la valoración de la vulnerabilidad y riesgo derivados de esos impactos.

Para categorizar los impactos, a través de los documentos analizados, se han identificado 7 ejes de riesgo (o amenazas climáticas) y 8 áreas o sectores de actuación donde los impactos del cambio climático son o serán relevantes en las próximas décadas, bien debido a su vulnerabilidad, su exposición o su relevancia para la gestión urbana (Cuadro nº 2).

Cuadro nº 2. AMENAZAS IDENTIFICADAS Y SECTORES AMENAZADOS

Amenazas identificadas	Sectores o áreas de gestión urbana amenazados
1. Aumento del nivel del mar	1. Urbanismo (inc. elementos físicos y procesos urbanos)
2. Oleaje extremo	2. Ecosistemas (inc. paisaje)
3. Precipitación intensa	3. Salud
4. Disminución de las precipitaciones	4. Recursos hídricos (inc. infraestructuras)
5. Aumento de las temperaturas	5. Agricultura, ganadería y piscicultura (AGP)
6. Olas de calor	6. Actividades económicas
7. Vendavales	7. Energía (sector energía inc. infraestructuras)
	8. Sociedad (personas y comunidades inc. bienestar, servicios y asistencia)

Fuente: Elaboración propia.

La clasificación que muestra el cuadro nº 2 de amenazas y sectores ha sido desarrollada y se ha visto influenciada por el contenido y la estructura de los análisis de impactos, vulnerabilidad y riesgos en los documentos analizados. Como veremos en los resultados de este estudio, algunas amenazas suceden en muchos casos combinadas (aumento de temperaturas y olas de calor, subida del nivel del mar y oleaje) pero su naturaleza gradual (aumento temperaturas y subida del nivel de mar) o eventual (olas de calor y oleaje extremo) requiere un trato individual. En el caso de los sectores, se han identificado aquellas actividades y sectores prioritarios y de mayor im-

portancia en las ciudades analizadas, tal y como se describen en los documentos. En cualquier caso, los impactos identificados no se ven comprometidos y se pueden estudiar de forma individual, si bien pueden ocurrir sinérgicamente con otros, maximizando el resultado (daño) final.

En el apartado 3 se presentan los impactos identificados (detallados en cuadro A2) por sector de interés para, a continuación, resaltar unos aspectos relevantes respecto a la valoración y cuantificación de estos impactos. Siguiendo el marco conceptual del IPCC, (2014b), en el que se hace énfasis en la incertidumbre como factor de influencia en el riesgo climático (como un producto de la magnitud y probabilidad de la amenaza, y de la vulnerabilidad del sistema) y en los costes y beneficios del cambio climático y de la adaptación en concreto, en el siguiente apartado, también se discuten estos aspectos: impactos positivos del cambio climático, magnitud y proyecciones, factores intensificadores de los impactos, impactos en cascada, incertidumbre, y por último, aspectos de igualdad y justicia climática.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados del análisis junto con una discusión detallada del contexto en que estos han sido identificados en el marco de los planes y un análisis de aspectos relevantes a tener en cuenta en el marco de la evaluación de impactos climáticos. El Anexo (Cuadro A2) recoge la lista detallada de los impactos climáticos identificados en las ciudades (Cuadro nº 1) para cada uno de los sectores y según cada amenaza identificada (Cuadro nº 2), agrupadas según su clima regional (ver cuadros A1 y A2).

3.1. Impactos identificados por sector urbano de actuación

3.1.1. Impactos sobre el urbanismo

Las amenazas más importantes para este sector son el aumento de las temperaturas y de los episodios de olas de calor, así como el incremento de las precipitaciones intensas. Tanto las inundaciones (de origen pluvial o fluvial) como el aumento de las temperaturas, provocan una reducción del confort y la habitabilidad de los edificios y el espacio público; el deterioro y debilitamiento de mobiliario urbano y estructuras (incrementado por los potenciales deslizamientos asociados a lluvias torrenciales o por la expansividad de las arcillas en el terreno); o el incremento en los gastos de mantenimiento de las redes de infraestructura debido a eventos extremos.

Tal y como mencionan la mayor parte de los documentos analizados, las inundaciones generalmente se derivan de (o son agravadas por) la saturación y daños en los sistemas de drenaje urbano, lo que dificulta una correcta evacuación de las aguas. En el caso de las ciudades costeras y portuarias, se incluyen impactos derivados de la subida del nivel del mar, así como del aumento del oleaje extremo, que suelen estimarse de manera conjunta (como en el caso de Donostia-San Sebastián o Barcelo-

na), ya que sus efectos son muy semejantes, aunque con diferente grado de intensidad y/o temporalidad. Las consecuencias de estas amenazas incluyen la inundación y daños de edificios y de la infraestructura portuaria (Donostia-San Sebastián, Barcelona) o el riesgo de fallo de diques (Valencia). También es importante considerar posibles impactos ocasionados por vendavales, como afectaciones a las redes de generación y suministro eléctrico y de gas; o perturbaciones en el abastecimiento de combustibles por el cierre de puertos (Valencia). En ocasiones, los impactos sobre los procesos humanos y sociales asociados a los elementos urbanos pueden llegar a ser significativos. Por ejemplo, los impactos de las inundaciones o el calor excesivo sobre los valores recreativos y paisajísticos de la ciudad, o sobre los patrones de uso del espacio público (Vitoria-Gasteiz).

3.1.2. *Impactos sobre los ecosistemas*

La disminución de las precipitaciones combinada con el aumento de temperaturas podría afectar a la biodiversidad local, debilitando la masa forestal y aumentando el peligro de plagas, enfermedades o incendios, pudiendo incluso llegar a la desaparición de determinados paisajes (terrestres y acuáticos), y a un incremento en los costes de mantenimiento de las áreas verdes urbanas. Las altas temperaturas podrían afectar a especies especialmente vulnerables como peces, anfibios y mariposas, y aumentar la propagación de especies plaga como cucarachas y múridos (Barcelona). El aumento de las temperaturas también podría generar un empeoramiento de la calidad del aire (Vitoria-Gasteiz, Murcia, Zaragoza). Además, todos estos efectos se verían potenciados durante las olas de calor. El aumento de las precipitaciones intensas provoca la pérdida de suelos por erosión y deslizamientos, y los ecosistemas acuáticos podrían verse afectados por la contaminación derivada del fallo en los sistemas de depuración de agua. Esto podría desembocar en una pérdida de funcionalidad paisajística, recreativa y educativa de las áreas verdes y cauces fluviales (Vitoria-Gasteiz). El aumento del nivel del mar combinado con un fuerte oleaje podría afectar a los ecosistemas y geomorfología costera debido a la erosión y el retroceso de la línea de costa (Valencia, Barcelona) conduciendo a una pérdida de funcionalidad ecosistémica, además de una pérdida de su función de protección de infraestructuras y población.

3.1.3. *Impactos sobre la salud*

La salud de la población urbana es una de las variables más afectadas por las amenazas climáticas. Entre los impactos más significativos y más indiscutibles dentro del análisis realizado es el aumento de la mortalidad y la morbilidad por estrés térmico en la ciudadanía más vulnerable (enfermedades cardiovasculares, respiratorias o alergias), agravado durante episodios de olas de calor. Se alude al efecto combinado del aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones como el causante del incremento de enfermedades vectoriales transmitidas por mosquitos, o de enfermedades infecciosas derivadas del aumento de los patógenos en el

agua o los alimentos (legionela, salmonelosis, etc.) (Girona, Lleida, Valencia). Como resultado del aumento de precipitaciones intensas, se identifican daños personales por desbordamientos e inundaciones (desde ahogamientos o lesiones físicas hasta depresiones posteriores a un evento extremo), el incremento de enfermedades diarreicas por la contaminación de fuentes de agua, y el aumento de las desigualdades en el acceso a salud. Como resultado, se identifica un potencial aumento de la demanda asistencial y de servicios sanitarios, así como cambios en los estilos de vida debidos al aumento de temperatura y precipitaciones (Vitoria-Gasteiz).

3.1.4. *Impactos sobre los recursos hídricos*

Uno de los impactos más relevantes en este sector es la contaminación y desequilibrio ecológico de las reservas y cauces de agua, ya sea debido a la saturación de las redes de saneamiento (por lluvias intensas), a la reducción de cauces y la resultante eutrofización y aumento de patógenos (por aumento de temperaturas y disminución de precipitaciones), o a la intrusión salina por sobreexplotación del acuífero costero (Valencia). Esta contaminación implicará, asimismo, mayores necesidades de tratamiento y, por consiguiente, de los costes asociados. Además, el efecto combinado de la disminución de precipitaciones y aumento de las temperaturas generará un incremento de la demanda de agua para consumo y para riego de zonas verdes (Córdoba, Girona, Guadalajara), ejerciendo presión sobre este recurso y su infraestructura. Las lluvias intensas podrían provocar la erosión de las márgenes fluviales y posibles colapsos en el terreno, así como potenciales daños sobre infraestructuras de contención, distribución y tratamiento (Vitoria-Gasteiz).

3.1.5. *Impactos sobre la agricultura, ganadería y piscicultura (AGP)*

Las amenazas climáticas consideradas implicarán afecciones a los ciclos de cultivo y una modificación/reducción del rendimiento y la calidad de los cultivos, así como alteraciones en la producción forestal, ganadera y piscícola (Vitoria-Gasteiz, Valencia). Estos impactos serán ocasionados principalmente por el aumento de las temperaturas y el estrés hídrico derivado de la disminución de precipitaciones, que pueden resultar en una desertificación de los suelos, debilitación de las especies de cultivo y propagación de enfermedades, plagas o incendios (Córdoba). El estrés hídrico implicaría también un aumento de los tiempos de riego y de los gastos asociados. El aumento de precipitaciones intensas podría generar daños en infraestructuras y equipamientos de producción agrícola (Vitoria-Gasteiz).

3.1.6. *Impactos sobre las actividades económicas*

Se reconoce un potencial impacto negativo del cambio climático sobre la industria del turismo (Vitoria-Gasteiz, Córdoba, Madrid) debido sobre todo al incremento de temperaturas y olas de calor en zonas ya de por sí de clima cálido, además de por la posibilidad de que aumente la presencia de especies peligrosas como las medusas (Valencia). Por otro lado, un potencial aumento del turismo en invierno po-

dría generar una mayor presión sobre los servicios urbanos (demanda de agua, energía, infraestructuras, etc.) (Vitoria-Gasteiz). El sector industrial podría verse igualmente afectado por el aumento del consumo energético y la escasez de recursos hídricos, ocasionando una competencia y enfrentamientos entre diferentes colectivos o sectores por la obtención de estos recursos (Córdoba, Lleida, Valencia). El aumento de la temperatura también podría afectar a la industria de manera indirecta, por el empeoramiento de la salud del personal trabajador debido a las condiciones climáticas extremas (Vitoria-Gasteiz). En cuanto a los impactos por las precipitaciones intensas, estarían relacionados con los daños que las inundaciones y los episodios extremos podrían ocasionar a las instalaciones (incrementando los gastos de su mantenimiento), al personal trabajador (aumentando del coste de la cobertura de los seguros) o a las líneas de transporte y distribución (elevando sus costes y generando retrasos y paralización de servicios).

3.1.7. *Impactos sobre el sector energético*

En general, se reconoce que el aumento de las temperaturas y episodios de olas de calor modificarán la dinámica de la demanda energética y aumentarán el consumo. Además, se prevén posibles afectaciones a las redes de suministro por eventos extremos y una menor capacidad conductiva y de generación de energía fotovoltaica (Córdoba); y riesgo de sobrecarga e interrupción del abastecimiento debido al aumento de demanda para refrigeración (Valencia). Por otro lado, la disminución de las precipitaciones podría conllevar la interrupción de la actividad de centrales eléctricas por la dificultad de refrigeración (Valencia); ineficiencia en la producción hidroeléctrica; y una menor capacidad de producir recursos geotérmicos de baja temperatura por la disminución del caudal de los acuíferos (Córdoba). Los impactos derivados de las precipitaciones intensas sobre las instalaciones energéticas y redes de suministro eléctrico están en general asociados a las inundaciones, golpes de tormenta, erosión, deslizamientos o caída de árboles (Córdoba, Valencia).

3.1.8. *Impactos sobre la sociedad*

Se consideran como parte de los impactos climáticos sobre la sociedad todos aquellos que pueden conllevar una alteración del bienestar, como por ejemplo los cortes del suministro de servicios debido a inundaciones, «picos» en la demanda o incendios; o el deterioro bienestar y aumento de las desigualdades debido al incremento de los problemas de salud o el envejecimiento de las áreas rurales (Vitoria-Gasteiz). Esto puede resultar en un aumento de la demanda de ayuda a grupos vulnerables y una posible pérdida de valores culturales e identitarios por los cambios en las relaciones sociales y los patrones de uso del espacio. La disminución de precipitaciones y la escasez de agua pueden dar lugar a un aumento de los precios del agua y los alimentos (Barcelona, Valencia). Además, los eventos extremos podrían conllevar un aumento del coste de la cobertura de los seguros debido a impactos ocasionados por inundaciones (Vitoria-Gasteiz) y vendavales (Valencia), entre otros.

3.2. Potenciales impactos positivos del cambio climático

Aunque los impactos generalmente son identificados por las consecuencias negativas sobre la gestión urbana, los ecosistemas y recursos, la planificación y las infraestructuras, las actividades económicas o la población, en muchos casos también se reconocen impactos a los que se les atribuyen efectos tanto positivos como negativos. Por ejemplo, el aumento del turismo puede dar lugar a un aumento de actividad económica pero también a un aumento en la presión en los recursos debido a la demanda de servicios urbanos (Vitoria-Gasteiz). Por otro lado, diferentes especies pueden rendir más o menos debido a los cambios climáticos. Por ejemplo, mientras algunas especies hortícolas pueden verse amenazadas por el estrés térmico, otras especies (como los cereales de invierno) pueden experimentar un incremento de la productividad por estimulación biológica (Lleida). Pueden darse, además, cambios en la producción forestal, ganadera y agrícola, así como en el tipo de especies piscícolas capturadas (Vitoria-Gasteiz), lo cual no necesariamente implica que esas modificaciones tengan efectos negativos, también podrían ser positivos. Por último, se observa que las condiciones climáticas extremas proyectadas y su efecto negativo sobre la producción agrícola, sobre todo en épocas estivales, podría implicar un movimiento migratorio hacia la zona urbana del término municipal. Es significativo que, en ciudades como Córdoba, este movimiento migratorio pueda observarse como positivo debido a un flujo negativo de migración en años anteriores. Ante un escenario preocupante de abandono rural en España, los efectos del cambio climático sobre los flujos migratorio rurales-urbanos requieren un análisis más profundo y sus consecuencias positivas o negativas dependerán del contexto específico (abandono rural o despoblación urbana).

3.3. Magnitud y proyección de impactos

No solo es importante identificar los impactos del cambio climático en áreas urbanas, sino también, determinar su severidad, magnitud y proyección a corto, medio y largo plazo. Una valoración de la magnitud de los impactos climáticos a nivel urbano realizada de esta manera sentaría las bases para una priorización de las medidas de actuación según su urgencia, evolución temporal e incertidumbre. En Valencia y Murcia, por ejemplo, se ha llevado a cabo una priorización comparativa de los sectores, en varios periodos temporales y en función del riesgo climático al que están expuestos. Se identifica, de esta manera, al sector agua como prioritario desde la actualidad y hasta finales de siglo debido a las sequías repetidas y la dependencia de los demás sectores.

En el caso de las políticas analizadas en el presente estudio, son pocos casos los que presentan una evaluación cuantificada de los impactos considerados. Zaragoza hace una evaluación de los impactos de los extremos de temperatura y Barcelona presenta cifras orientativas sobre la reducción de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en 2050 o del porcentaje de reducción del área de playas por la subida

del nivel del mar. Sin embargo, para el resto de impactos y sectores considerados, tanto en estas como en el resto de políticas, únicamente se define el grado de riesgo o vulnerabilidad en una escala orientativa (de «muy bajo» a «muy alto», por ejemplo). Esto sería válido como un primer acercamiento a la identificación de necesidades y priorización de amenazas, sin embargo, a la hora de decidir sobre los recursos a asignar a cada medida de adaptación, sería extremadamente útil tener información más detallada sobre impactos evitados y, en base a estos, sobre los costes de los escenarios de actuación propuestos, además de una contabilidad de los efectos positivos o negativos sobre otros sectores, comunidades o servicios urbanos.

Aunque existe una carencia general en la evaluación de los impactos futuros en función de los cambios en vulnerabilidad o exposición, en casi todos los casos se desarrollan o proponen una serie de proyecciones climáticas futuras de referencia. Cuando no existen proyecciones a futuro sobre los impactos del cambio climático, es necesario valorar la posibilidad de que el escenario a corto plazo pueda cambiar significativamente respecto al observado en las tendencias de los últimos años. En algunos casos, incluso, puede darse la situación de que no se haya evidenciado en la actualidad una situación de empeoramiento respecto a un indicador en particular. Así, por ejemplo, el diagnóstico realizado para Zaragoza indica que el impacto debido al calor sobre la mortalidad ha disminuido en las últimas décadas. Este fenómeno aparentemente positivo no es exclusivo de esta ciudad, sino que se ha observado a nivel de toda España y en muchas otras ciudades del mundo (Díaz *et al.*, 2018). Esto se debe a una mejora generalizada de los planes de prevención en las últimas décadas, al aumento del aire acondicionado —clásico ejemplo de maladaptación (Barnett & O'Neill, 2010; Juhola *et al.*, 2016) debido al consecuente aumento del consumo de energía y emisión de calor de las instalaciones actuales (Davis & Gertler, 2015)—, a la mejora de los servicios sanitarios e infraestructuras y a un potencial cambio de hábitos más adaptados al calor (Ayuntamiento de Zaragoza, 2019).

Aunque en algunos casos los escenarios actuales no indiquen alarma, los escenarios climáticos apuntan de forma generalizada en toda España a un incremento de los eventos extremos, de su intensidad, frecuencia y duración, que es necesario tener en cuenta en las evaluaciones de los impactos climáticos. Por esta razón, y en el caso concreto del aumento de temperaturas extremas, en muchas ciudades se identifica un claro aumento del riesgo en el corto plazo (Zaragoza, Murcia, Valencia...).

3.4. Factores intensificadores de los impactos del cambio climático

La existencia de varios condicionantes climáticos adversos al mismo tiempo es considerada en todos los casos como un factor intensificador de los impactos del cambio climático (Forzieri *et al.*, 2016). Así, por ejemplo, una ola de calor en un periodo en el que hay un paulatino aumento de las temperaturas mínimas y máximas puede dar lugar a unos impactos mucho mayores de los esperados. En el cuadro A2, se han identificado los impactos debidos a olas de calor que son intrínse-

cos a estos fenómenos, pero también hay que tener en cuenta que se verán acompañados por muchos de aquellos impactos ligados a ‘Aumento de temperaturas mínimas y máximas’. Otros ejemplos son el aumento del nivel del mar combinado con el oleaje, el aumento de precipitaciones intensas y los vendavales. Por ejemplo, en Donostia-San Sebastián, se evalúan conjuntamente los impactos de la subida del nivel del mar con el oleaje extremo, ya que sus efectos son similares y se potencian entre sí. La diferencia en cuanto a la modelización de esos impactos es que en un caso ocurren de manera gradual y en el otro de manera repentina y mediante diferentes mecanismos, y esta temporalidad incidirá significativamente en el tipo de medidas necesarias para hacerles frente (la estrategia de planificación de la ciudad frente al aumento del nivel del mar puede hacerse de manera progresiva y a largo plazo, mientras que los efectos del oleaje extremo podrían requerir los servicios de emergencia para evacuar a la población afectada). Asimismo, la disminución de las precipitaciones es un factor que agrava el efecto del aumento de las temperaturas en múltiples impactos, como el empeoramiento de la calidad del aire, el debilitamiento de la vegetación y aumento de peligro de plagas, enfermedades o incendios, etc. Los usos del suelo de las ciudades, así como el propio diseño urbano (densidad, morfología, orientación, pavimentación, etc.), son de gran importancia en la estimación de las consecuencias del cambio climático, puesto que son uno de los factores intensificadores externos de impacto más importantes en las áreas urbanas. Por una parte, los impactos derivados de las inundaciones son agravados por el alto grado de impermeabilización de los suelos en las ciudades, entre otros factores (Barcelona). Por otro lado, estudios sugieren que la isla de calor urbana aumenta durante condiciones de temperatura más elevadas y especialmente durante los episodios de ola de calor, viéndose además agravada la situación por la falta de humedad superficial en las áreas urbanas y a la baja velocidad del viento asociada con las olas de calor (Li & Bou-Zeid, 2013)¹.

En algunos de los casos analizados (Vitoria-Gasteiz, Madrid), se considera y analiza la isla de calor como un factor que reducirá el confort térmico en las ciudades y que afectará a la salud humana (derivados del empeoramiento del confort térmico, calidad del aire, calidad del agua y de los alimentos, estado de las infraestructuras etc.), el consumo energético y el consumo de agua a nivel público y privado. En Vitoria-Gasteiz, por ejemplo, se realiza como diagnóstico un mapa térmico de la ciudad que, según este informe, permite identificar zonas donde las variaciones climáticas esperables (aumento de temperaturas extremas y olas de calor) pueden tener una incidencia mayor; en este caso, en los polígonos industriales y el casco histórico (Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz, 2011). En Madrid, factores condicionantes

¹ Sin embargo, hay estudios como el de Scott *et al.* (2018), realizado en 54 ciudades estadounidenses, que apuntan a una disminución de la intensidad de la isla de calor urbana, medida como las diferencias en las temperaturas mínimas diarias o máximas diarias entre las estaciones urbanas y rurales, con el aumento de la temperatura.

de la isla de calor urbana como la densidad urbana, las condiciones habitacionales de los edificios o la accesibilidad a espacios verdes fueron incluidos como indicadores de sensibilidad o capacidad adaptativa para evaluar la vulnerabilidad de las diferentes zonas de la ciudad.

3.5. Efectos en cascada

La priorización de las medidas de actuación depende, en general, del nivel de riesgo climático al que están expuestos los sectores en los que se pretende actuar, de la oportunidad que se presente (por ejemplo, al planificar una nueva infraestructura o un nuevo desarrollo urbano) y, por otra parte, de los impactos climáticos indirectos en diferentes sectores y de los vínculos (co-beneficios o dependencias) entre opciones de adaptación (Dawson, 2015; Hunt & Watkiss, 2010). El papel de estas conexiones puede resultar significativo (Olazabal *et al.*, 2019a, 2018), de ahí que su evaluación (cuantitativa o cualitativa) sea relevante y en muchos casos crítica para la toma de decisiones. En la práctica, esto se ha llevado a cabo considerando el nivel de dependencia funcional o económica que supone un determinado sector para los demás (Murcia, Valencia) o evaluando mapas de impacto (Valencia) o cadenas de impacto (Madrid, Donostia-San Sebastián). Habitualmente esto conllevaría a la identificación de factores intensificadores del impacto, impactos principales y secundarios (o intermedios) (Mendizabal *et al.*, 2018).

Esta aproximación metodológica es útil como base para los análisis de vulnerabilidad y riesgo, ya que permite conocer en mayor profundidad los impactos en cascada que puedan acontecer a raíz de las conexiones entre sectores y procesos urbanos. En Murcia, por ejemplo, el sector ‘agua’ sería prioritario en los próximos años debido a la dependencia del resto de sectores, y en Valencia la vulnerabilidad del sector ‘salud’ irá aumentando con el tiempo a causa de los efectos colaterales de los impactos de los demás sectores en la salud de la población. También en Valencia se deduce que, para el sector ‘agua’, el incremento de las temperaturas provocará una reducción de la humedad atmosférica y del suelo (impacto directo), que a su vez demandará un mayor trabajo para cubrir el aumento de la demanda (impacto indirecto), que finalmente podría generar la sobreexplotación de los recursos hídricos, un aumento del coste y conflictos sobre el uso del agua (impactos últimos). En el caso de Madrid o Donostia-San Sebastián se preseleccionan una serie de «cadenas de impacto» concretas definidas en teoría mediante la elaboración de «árboles de problemas» que identifican relaciones causa-efecto entre los cambios en las variables climáticas y las consecuencias sobre los diferentes sectores.

3.6. Incertidumbre

La incertidumbre ante el riesgo climático es esencial a la hora de evaluar los impactos del cambio climático y se expresa normalmente como probabilidad asociada a diferentes escenarios de impactos (Feliu *et al.*, 2015). A pesar de esta gene-

ralidad, la incertidumbre puede tener diferentes orígenes aparte de la falta de datos o de precisión de los modelos, como son la ambigüedad en el uso de los conceptos y la propia complejidad de los sistemas que nos dificulta conocer los efectos precisos de cada acción sobre el sistema (Markandya, 2014); en este caso, los impactos. Por ejemplo, Abadie *et al.* (2019) evalúan el riesgo del aumento del nivel del mar con su incertidumbre asociada en 600 ciudades europeas, entre ellas 36 ciudades españolas, teniendo en cuenta la probabilidad de daños económicos (enfatisando aquellos con baja probabilidad, pero de mayor intensidad) en una línea temporal desde la actualidad hasta 2100. El estudio revela que, de forma general y con baja probabilidad, pueden ocurrir daños muy significativos y que es necesario tener en cuenta estas estimaciones en la toma de decisiones. Este tipo de cálculos pueden ser utilizados para establecer umbrales aceptables de riesgo según la incertidumbre relativa a su temporalidad y su severidad o para realizar test de estrés de diferentes opciones de adaptación (Galarraga *et al.*, 2018). Dentro de los documentos analizados, algunos subrayan la incertidumbre debido a la falta de información sobre los impactos en determinados sectores (Vitoria-Gasteiz), otros lidian con la incertidumbre mediante la definición de rangos de probabilidad de ocurrencia de determinados impactos (Córdoba); y otros indican que se aplicó el «principio de precaución» (que, según los documentos analizados, consistiría en «situarse en la peor situación posible») aplicando coeficientes de seguridad (Donostia-San Sebastián, Madrid o Vitoria-Gasteiz).

3.7. Igualdad y justicia en la distribución de impactos

Por último, es importante tener en cuenta que el cambio climático exacerbará muchos de los problemas actuales en las ciudades, ya que determinados grupos sociales se verán especialmente afectados debido a su menor capacidad de preparación, afrontamiento y recuperación ante los impactos. Esto incrementará las desigualdades actuales originadas por la pobreza, acceso a recursos y servicios y la calidad ambiental que afectan a grupos marginales y minorías normalmente concentradas en el espacio (Reckien *et al.*, 2017; Shi *et al.*, 2016). Esto hace que la evaluación de los impactos derivados de los planes de actuación, así como la distribución de los beneficios (cuánto riesgo reducen y en qué horizonte temporal), de los costos y de las responsabilidades de adaptación sea crítica (Chambwera *et al.*, 2014). Es fundamental, por tanto, facilitar la participación de los grupos marginados a través de dinámicas iterativas para caracterizar los impactos y comunicar las evaluaciones de riesgos climáticos realizados con las partes interesadas, de forma que se retroalimente el proceso y se prioricen resultados beneficiosos para los grupos más desfavorecidos y vulnerables (Angelovski *et al.*, 2016). Ciudades como Barcelona, Madrid y Zaragoza, analizan los impactos derivados del cambio climático sobre grupos vulnerables, pero aún es un área en la que es necesaria una mayor reflexión y trabajo a nivel práctico, y que será necesario integrar con otros programas existentes en las ciudades como las Agenda Locales 21.

4. CONCLUSIONES

En el marco de la planificación y la política climática, las ciudades son actores clave en la estimación de riesgos e impactos climáticos, ya que tienen acceso a datos espaciales de población y bienes expuestos, así como conocimiento y experiencia sobre las causas y la magnitud de los daños debidos a eventos climáticos sufridos en el pasado. Este tipo de información, además, es indispensable para planificar medidas de adaptación adecuadas evaluando su coste y su beneficio para la sociedad urbana y los sistemas que la soportan.

En este estudio hemos analizado 11 planes de adaptación identificados en 54 ciudades españolas (52 capitales y 2 ciudades autónomas). De entre la documentación asociada a la planificación climática, hemos extraído información acerca de los impactos climáticos esperados en cada uno de los sectores y según cada amenaza identificada. Hemos querido proporcionar una revisión del grado de evidencia de los impactos climáticos a nivel local, del nivel de detalle de las evaluaciones y de las posibles oportunidades, carencias y limitaciones del estado de la cuestión a nivel práctico.

Hemos detectado que no existe una metodología concreta y acordada para la identificación, evaluación y proyección de impactos. Cada municipio sigue un proceso particular en función de su disponibilidad de datos, objetivos técnicos o políticos. Hemos detectado, asimismo, una fuerte dependencia del equipo consultor en cada caso, que trasfiere las metodologías de trabajo de unas ciudades a otras. Hemos puesto de relieve la importancia de analizar los impactos en cadena y relaciones intersectoriales, así como factores potenciadores o inhibidores de los impactos y la repercusión de la temporalidad de diferentes amenazas. A pesar de la existencia de proyecciones climáticas en casi todos los casos, hemos notado la carencia general de una estimación cuantitativa de los impactos actuales o futuros. También, hemos notado una falta de consideración de la incertidumbre en la estimación de riesgos e impactos climáticos y la necesidad de incluir aspectos de equidad y justicia en los diagnósticos de vulnerabilidad, riesgos e impactos climáticos.

Finalmente, nos gustaría subrayar que lo identificado con esta metodología no es exhaustivo del estado de la cuestión en el ámbito español, sino que evidencia la potencial concurrencia actual o futura de estos impactos en concreto y por lo tanto justifica su estudio para la evaluación de los impactos climáticos en otras ciudades españolas, en los casos en los que sea apropiado, bien por contexto climático, social, económico, ambiental o geográfico. Cada ciudad aborda la planificación climática según sus necesidades, recursos y capacidades y, por lo tanto, se entiende que estudios futuros podrán ampliar esta información y añadir más y mejor información cualitativa, y sobre todo cuantitativa, para su evaluación y la consiguiente planificación climática.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABADIE, L.M.; GALARRAGA, I.; MARKANDYA, A.; SAINZ DE MURIETA, E. (2019): «Risk measures and the distribution of damage curves for 600 European coastal cities», *Environmental Research Letters*, 14: 064021.
- ABADIE, L.M.; GALARRAGA, I.; SAINZ DE MURIETA, E. (2017): «Understanding risks in the light of uncertainty: low-probability, high-impact coastal events in cities», *Environmental Research Letters*, 12: 014017.
- AERTS, J.C.J.H.; BOTZEN, W.J.W.; EMANUEL, K.; LIN, N.; MOEL, H. DE; MICHEL-KERJAN, E.O. (2014): «Evaluating Flood Resilience Strategies for Coastal Megacities», *Science*, 344: 473-475.
- AJUNTAMENT DE GIRONA (2017): «Pla d'Acció pel Clima i l'Energia Sostenible de Girona».
- AJUNTAMENT DE LLEIDA (2015): «Pla d'adaptació al Canvi Climàtic del Municipi de Lleida».
- ANDERSON, G.B.; OLESON, K.W.; JONES, B.; PENG, R.D. (2018): «Projected trends in high-mortality heatwaves under different scenarios of climate, population, and adaptation in 82 US communities», *Climatic Change*, 146: 455-470.
- ANGUELOVSKI, I.; SHI, L.; CHU, E.; GALLAGHER, D.; GOH, K.; LAMB, Z.; REEVE, K.; TEICHER, H. (2016): «Equity Impacts of Urban Land Use Planning for Climate Adaptation: Critical Perspectives from the Global North and South», *Journal of Planning Education and Research*, 36: 333-348.
- ARAOS, M.; BERRANG-FORD, L.; FORD, J.D.; AUSTIN, S.E.; BIESBROEK, R.; LESNIKOWSKI, A. (2016): «Climate change adaptation planning in large cities: A systematic global assessment», *Environmental Science & Policy*, 66: 375-382.
- AYUNTAMIENTO DE BARCELONA (2018): «Plan Clima 2018-2030».
- AYUNTAMIENTO DE CÓRDOBA (2018a): «Plan Estratégico Municipal de Adaptación al Cambio Climático de Córdoba: Medidas de Actuación».
- (2018b): «Plan Estratégico Municipal de Adaptación al Cambio Climático de Córdoba: Diagnóstico II: Vulnerabilidades».
- (2018c): «Plan Estratégico Municipal de Adaptación al Cambio Climático de Córdoba: Diagnóstico I: Escenarios Climáticos y Amenazas».
- AYUNTAMIENTO DE GUADALAJARA (2018): «Estrategia de Adaptación al Cambio Climático de Guadalajara».
- AYUNTAMIENTO DE MADRID (2017): «Plan de calidad del aire y cambio climático. Plan A».
- (2015): «Análisis de Vulnerabilidad ante el Cambio Climático en la ciudad de Madrid».
- AYUNTAMIENTO DE MURCIA (2018): «Estrategia de Adaptación al Cambio Climático del Municipio de Murcia a 2030».
- AYUNTAMIENTO DE VITORIA-GASTEIZ (2014): «Estrategia de Adaptación al Cambio Climático de Vitoria-Gasteiz. Horizonte 2014-2020», Borrador.
- (2011): «Plan de Adaptación al Cambio Climático de Vitoria-Gasteiz. Etapa 1. Informe de resultados de las Fases I y II: Escenarios climáticos y análisis de la vulnerabilidad por sectores».
- AYUNTAMIENTO DE ZARAGOZA (2019): «Estrategia de Cambio Climático, Calidad del Aire y Salud de Zaragoza - ECAZ 3.0».
- BARNETT, J.; O'NEILL, S. (2010): «Maladaptation», *Global Environmental Change*, 20: 211-213.
- CEDEX / MAPAMA (2017): «Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España. Oficina de Cambio Climático», Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Gobierno de España, Madrid.
- CHAMBWERA, M.; HEAL, G.; DUBEUX, C.; HALLEGATTE, S.; LECLERC, L.; MARKANDYA, A.; MCCARL, B.A.; MECHLER, R.; NEUMANN, J.E., (2014): *ECONOMICS OF ADAPTATION*, IN: FIELD, C.B.; BARROS, V.R.; DOKKEN, D.J.; MACH, K.J.; MASTRANDREA, 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.; MASTRANDREA, P.R.; WHITE, L.L. (Eds.), «Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects», Contri-

bution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 945-977.

- COALITION FOR URBAN TRANSITIONS (2019): Climate Emergency, Urban Opportunity.
- DAVIS, L.W.; GERTLER, P.J. (2015): «Contribution of air conditioning adoption to future energy use under global warming», *PNAS*, 112: 5962-5967.
- DAWSON, R.J. (2015): «Handling Interdependencies in Climate Change Risk Assessment», *Climate*, 3: 1079-1096.
- DE GREGORIO HURTADO, S.; OLAZABAL, M.; SALVIA, M.; PIETRAPERTOSA, F.; OLAZABAL, E.; GENELETTI, D.; D'ALONZO, V.; DI LEO, S.; RECKIEN, D. (2015): «Understanding How and Why Cities Engage with Climate Policy: An Analysis of Local Climate Action in Spain and Italy», *TEMA Journal of Land Use, Mobility and Environment*, 8: 23-46.
- DE LA COLINA, J.; MORENO, J.; RUIZ, P.; SUAREZ, R. (2019): «Informe diagnóstico de riesgos y oportunidades de la adaptación al cambio climático en las ciudades», Forética.
- DEFRIES, R.; EDENHOFER, O.; HALLIDAY, A.; HEAL, G.; LENTON, T.; PUMA, M.; RISING, J.; ROCKSTRÖM, J.; RUANE, A.C.; SCHELLNHUBER, H.J.; SATINFORT, D.; STERN, N.; TEDESCO, M.; WARD, B. (2019): «The missing economic risks in assessments of climate change impacts (Policy Brief)», Grantham Research Institute for Climate Change and the Environment. London School of Economics, London.
- DÍAZ, J.; ORTIZ, C.; FALCÓN, I.; SALVADOR, C.; LINARES, C. (2018): «Short-term effect of tropospheric ozone on daily mortality in Spain», *Atmospheric Environment*, 187: 107-116.
- DÍAZ-SARACHAGA, J.M.; JATO-ESPINO, D. (2020): «Analysis of vulnerability assessment frameworks and methodologies in urban areas», *Nat Hazards*, 100: 437-457.
- DONOSTIAKO UDALA / AYUNTAMIENTO DE SAN SEBASTIÁN (2017a): «Plan de Adaptación al cambio climático de Donostia/San Sebastián», Entregable 1: Diagnóstico.
- (2017b): «Plan de Adaptación al cambio climático de Donostia/San Sebastián», Entregable 2: Plan de Adaptación.
- ESPON, IRPUD, TU DORTMUND UNIVERSITY (2011): «ESPON Climate: Climate Change and Territorial Effects on Regions and Local Economies», *Draft Final Report. ESPON 2013 Programme*, Luxembourg.
- ESTRADA, F.; BOTZEN, W.J.W.; TOL, R.S.J. (2017): «A global economic assessment of city policies to reduce climate change impacts», *Nature Climate Change*, 7: 403-406.
- FACTOR CO2 (2017): «Plan de Adaptación al Cambio Climático de Valencia 2050».
- FELIU, E.; GARCIA, G.; GUTIERREZ, L.; ABAJO, B.; MENDIZABAL, M.; TAPIA, C.; ALONSO, A. (2015): «Guía para la elaboración de Planes Locales de Adaptación al Cambio Climático. Oficina Española de Cambio Climático», Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Gobierno de España, Madrid, España.
- FORZIERI, G.; FEYEN, L.; RUSSO, S.; VOUSDOKAS, M.; ALFIERI, L.; OUTTEN, S.; MIGLIAVACCA, M.; BIANCHI, A.; ROJAS, R.; CID, A. (2016): «Multi-hazard assessment in Europe under climate change», *Climatic Change*, 137: 105-119.
- 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: 029401.
- HALLEGATTE, S.; GREEN, C.; NICHOLLS, R.J.; CORFEE-MORLOT, J. (2013): «Future flood losses in major coastal cities», *Nature Climate Change*, 3: 802-806.
- HUNT, A.; WATKISS, P. (2011): «Climate change impacts and adaptation in cities: a review of the literature», *Climatic Change*, 104: 13-49.
- IPCC (2014a): «Annex II: Glossary», en Agard, J., E.L.F. Schipper, J. Birkmann, M. Campos, C. Dubeux, Y. Nojiri, L. Olsson, B. Osman-Elasha, M. Pelling, M.J. Prather, M.G. Rivera-Ferre, O.C. Ruppel, A. Sallenger, K.R. Smith, A.L. St Clair, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, and T.E. Bilir (eds.), in: Barros, V.R., Field, C.B., Dokken, D.J., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth As-*

- essment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1757-1776.
- (2014b): 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 [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- JUHOLA, S.; GLAAS, E.; LINNÉR, B.O.; NESET, T.S. (2016): «Redefining maladaptation», *Environmental Science & Policy*, 55, Part 1, 135-140.
- LI, D.; BOU-ZEID, E. (2013): «Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves: The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts», *Journal of Applied Meteorology Climatology*, 52: 2051-2064.
- LOSADA, I.J.; IZAGUIRRE, C.; DIAZ, P. (2014): «Cambio climático en la costa española», Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Gobierno de España.
- MARKANDYA, A. (2014): «Incorporating Climate Change into Adaptation Programmes and Project Appraisal: Strategies for uncertainty», en: Markandya, A., Galarraga, I., Sainz de Murieta, E. (Eds.), *Routledge Handbook of the Economics of Climate Change Adaptation*, Routledge, pp. 97-119.
- MENDIZABAL, M.; ZORITA, S.; MARTINEZ, J.A.; FELIU, E.; CONNELLY, A.; CARTER, J.; GONZALEZ VARA, M.; RUIZ, S.; LANDAJO, J.A.; ELLIS, M. (2018): «D3.3. Policy guideline». RESIN project.
- OLAZABAL, M.; CHIABAI, A.; FOUDI, S.; NEUMANN, M.B. (2018): «Emergence of new knowledge for climate change adaptation», *Environmental Science & Policy*, 83: 46-53.
- OLAZABAL, M.; DE GREGORIO, S.; OLAZABAL, E.; PIETRAPERTOSA, F.; SALVIA, M.; GENELETTI, D.; D'ALONZO, V.; FELIÚ, E.; LEO, S.; DI, RECKIEN, D. (2014): «How are Italian and Spanish Cities tackling climate change? A local comparative study», *Basque Centre for Climate Change (BC3)*, Bilbao, Spain.
- OLAZABAL, M.; GALARRAGA, I.; FORD, J.; SAINZ DE MURIETA, E.; LESNIKOWSKI, A. (2019a): «Are local climate adaptation policies credible? A conceptual and operational assessment framework», *International Journal of Urban Sustainable Development*, 1-20.
- OLAZABAL, M.; RUIZ DE GOPEGUI, M.; TOMPKINS, E.L.; VENNER, K.; SMITH, R. (2019b): «A cross-scale worldwide analysis of coastal adaptation planning», *Environmental Research Letters*, 14, 124056.
- PERSSON, Å. (2019): «Global adaptation governance: An emerging but contested domain», *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, e618.
- RECKIEN, D.; CREUTZIG, F.; FERNANDEZ, B.; LWASA, S.; TOVAR-RESTREPO, M.; MCEVOY, D.; SATTERTHWAITE, D. (2017): «Climate change, equity and the Sustainable Development Goals: an urban perspective», *Environment and Urbanization*, 29:159-182.
- RECKIEN, D.; FLACKE, J.; DAWSON, R.J.; HEIDRICH, O.; OLAZABAL, M.; FOLEY, A.; HAMMANN, J.J.P.; ORRU, H.; SALVIA, M.; DE GREGORIO HURTADO, S.; GENELETTI, D.; PIETRAPERTOSA, F. (2014): «Climate change response in Europe: what's the reality? Analysis of adaptation and mitigation plans from 200 urban areas in 11 countries», *Climatic Change*, 122: 331-40.
- RECKIEN, D.; SALVIA, M.; HEIDRICH, O.; CHURCH, J.M.; PIETRAPERTOSA, F.; DE GREGORIO-HURTADO, S.; D'ALONZO, V.; FOLEY, A.; SIMOES, S.G.; KRKOŠKA LORENCOVÁ, E.; ORRU, H.; ORRU, K.; WEJS, A.; FLACKE, J.; OLAZABAL, M.; GENELETTI, D.; FELIU, E.; VASILIE, S.; NADOR, C.; KROOK-RIEKKOLA, A.; MATOSOVIC, M.; FOKAIDES, P.A.; IOANNOU, B.I.; FLAMOS, A.; SPYRIDAKI, N.-A.; BALZAN, M.V.; FÜLÖP, O.; PASPALDZHIEV, I.; GRAFAKOS, S.; DAWSON, R. (2018): «How are cities planning to respond to climate change? Assessment of local climate plans from 885 cities in the EU-28», *Journal of Cleaner Production*, 191: 207-219.
- REVI, A.; SATTERTHWAITE, D.E.; ARAGÓN-DURAND, F.; CORFEE-MORLOT, J.; KIUNSI, R.B.R.; PELLING, M.; ROBERTS, D.C.; SOLECKI, W. (2014): *Urban areas*, en: Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, 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., Mastrandrea, 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, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 535-612.

SAINZ DE MURIETA, E.; OLAZABAL, M.; SANZ, E. (2020) ¿Están las ciudades españolas adaptándose al cambio climático? *Papeles de Economía Española*, 163.

SCOTT, A.A.; WAUGH, D.W.; ZAITCHIK, B.F. (2018): «Reduced Urban Heat Island intensity under warmer conditions», *Environment Research Letters*, 13: 064003.

SHI, L.; CHU, E.; ANGUELOVSKI, I.; AYLETT, A.; DEBATS, J.; GOH, K.; SCHENK, T.; SETO, K.C.; DODMAN, D.; ROBERTS, D.; ROBERTS, J.T.; VANDEVEER, S.D. (2016): «Roadmap towards justice in urban climate adaptation research», *Nature Climate Change*, 6: 131-137.

TOBÍAS, A.; ARMSTRONG, B.; GASPARRINI, A.; DIAZ, J. (2014): «Effects of high summer temperatures on mortality in 50 Spanish cities», *Environmental Health*, 13: 48.

ANEXO

Este anexo contiene una lista detallada de los impactos climáticos esperados en cada uno de los sectores y según cada amenaza identificada (ver cuadro A2). Al entender que ciudades bajo el mismo tipo de clima sufrirán impactos climáticos similares, se han clasificado las ciudades de estudio en 6 climas (ver cuadro A1) con el objetivo de que el análisis aquí realizado sea transferible y utilizable en otros contextos climáticos propios de la península española.

Cuadro A1. CATEGORIZACIÓN DE CIUDADES SEGÚN SU CLIMA

Climas	Ciudades
Clima oceánico costero (COC)	Donostia-San Sebastián
Clima oceánico de transición (COT)	Vitoria-Gasteiz
Clima mediterráneo costero (CMC)	Barcelona, Girona, Valencia
Clima mediterráneo continentalizado de veranos cálidos (CMCV)	Guadalajara, Lleida, Madrid
Clima mediterráneo cálido de interior (CMCI)	Córdoba
Clima mediterráneo árido y subárido (CMAS)	Murcia, Zaragoza

Fuente: Elaboración propia en base a información del Instituto Geográfico Nacional.

Cuadro A2. REVISIÓN DE IMPACTOS CLIMÁTICOS IDENTIFICADOS EN ÁREAS URBANAS ESPAÑOLAS CLASIFICADOS SEGÚN ZONA CLIMÁTICA

Amenazas	Sectores y áreas amenazadas	Impactos climáticos identificados	COC	COT	CMC	CMCV	CMCI	CMAS
Aumento del nivel del mar	Urbanismo	Inundación de edificaciones costeras, redes de infraestructura urbana (principalmente de saneamiento y transporte) y otros elementos constructivos.	X		X			
		Daños a la infraestructura portuaria y aumento del riesgo de fallo de diques al aumentar su calado y los esfuerzos soportados.	X		X			
	Ecosistemas	Erosión.			X			
		Retroceso de la línea de costa.	X		X			
Oleaje extremo	Urbanismo	Inundación de edificaciones costeras, redes de infraestructura urbana (principalmente de saneamiento y transporte) y otros elementos constructivos.	X		X			
		Daños a la infraestructura portuaria y aumento del riesgo de fallo de diques al aumentar su calado y los esfuerzos soportados.	X		X			
	Ecosistemas	Erosión.			X			
		Retroceso de la línea de costa.	X		X			
Precipitación intensa	Urbanismo	Inundaciones fluviales.	X		X	X	X	
		Inundaciones pluviales por saturación y daños en los sistemas de drenaje.	X	X	X	X		X
		Inundación de las redes de infraestructura urbana y otros elementos constructivos.	X	X	X	X		
		Daños y reducción de la habitabilidad de la edificación en mal estado afectada por inundaciones.	X	X	X	X		
		Afectaciones a infraestructuras y edificios asociadas a deslizamientos y erosión por lluvias torrenciales.		X	X		X	X
		Incremento en los gastos de mantenimiento de la red eléctrica y de telecomunicaciones debido a vientos extremos, relámpagos, etc.		X				
		Pérdida de valores recreativos, paisajísticos, estéticos; y cambios en patrones de uso espacio y temporal (ejemplo, circuitos de paseos) debido a las inundaciones.	X	X				
	Ecosistemas	Aumento de deslizamientos, erosión, sedimentación y pérdida de suelos.		X	X			
		Cambios fenológicos y afectaciones a los ecosistemas terrestres y acuáticos por inundaciones y por la contaminación derivada del colapso de los sistemas de depuración de agua.		X	X			
		Pérdida de funcionalidad paisajística, recreativa y educativa de las áreas verdes.		X				

.../...

.../...

Amenazas	Sectores y áreas amenazadas	Impactos climáticos identificados	COC	COT	CMC	CMCV	CMCI	CMAS
Precipitación intensa	Salud	Daños personales por desbordamientos e inundaciones: ahogamientos, hipotermia, lesiones físicas, accidentes de tráfico, depresiones posteriores al evento, etc.		X	X		X	X
		Incremento de enfermedades diarreicas por la contaminación de fuentes de agua de consumo humano.			X			
		Aumento de las desigualdades en el acceso a salud.		X				
		Cambios en los estilos de vida (alimentación, actividad física).		X				
	Recursos hídricos	Contaminación / mala calidad de las aguas por aportaciones de escorrentía o saturación / mal funcionamiento de las redes de saneamiento.		X	X	X	X	
		Mayores necesidades de inversión en el pre-tratamiento del agua.			X			
		Erosión de las márgenes fluviales, incremento de las subsidencias, colapsos en el terreno y daños a infraestructuras.		X				
	AGP	Daños en infraestructuras y equipamientos.		X				
		Cambios en la producción forestal, ganadera y agrícola.		X				
	Actividades económicas	Afectación de las instalaciones y a la salud del personal trabajador y usuarios debido a las inundaciones y condiciones climáticas extremas.		X				
		Incremento de los gastos de mantenimiento de las instalaciones debidos a vientos extremos, tormentas, etc.		X				
		Retrasos, paralización y aumento del coste de transporte debido a desbordamientos o episodios extremos.		X	X		X	
		Impacto en las industrias extractivas (dificultad en las actividades de extracción).					X	
		Aumento del coste de la cobertura de los seguros debido a las inundaciones por lluvias extremas.		X				
	Energía	Afectaciones a las instalaciones y redes de suministro eléctrico asociadas a la erosión y deslizamientos por lluvias torrenciales y a eventos meteorológicos extremos (golpes de tormenta, caída de árboles...).			X		X	
	Sociedad	Alteración del suministro de servicios y transporte debido a las inundaciones que conllevan las lluvias extremas.		X				
		Aumento del coste de la cobertura de los seguros debido a las inundaciones.		X				
		Deterioro bienestar y aumento de las desigualdades.		X				
		Pérdida de valores culturales e identitarios y cambios en las relaciones sociales.		X				
		Aumento de la demanda de ayuda a grupos vulnerables.		X				

.../...

.../...

Amenazas	Sectores y áreas amenazadas	Impactos climáticos identificados	COC	COT	CMC	CMCV	CMCI	CMAS
Disminución de precipitaciones	Ecosistemas	Cambios fenológicos en fauna y flora, y cambio y/o pérdida de biodiversidad (reducción de hábitat de especies fluviales, desertificación...).		X	X	X	X	X
		Estrés hídrico de la vegetación, debilitamiento de la masa forestal e incremento de la propagación de enfermedades/plagas.			X			X
		Activación de incendios forestales.		X	X	X	X	
		Aumento de los costes de mantenimiento de la infraestructura verde.					X	
		Modificación/Desaparición de paisajes (terrestres y acuáticos).			X			
		Eutrofización de masas de agua superficiales.						X
	Salud	Afectación a la salud (aumento de la mortalidad y la morbilidad), sobre todo en la ciudadanía anciana, infantil, o con enfermedades.			X		X	
		Incremento de enfermedades infecciosas traídas en el agua, debidas a la sequía y menor dilución de contaminantes.			X	X	X	
		Reproducción de ciertos vectores infecciosos como los mosquitos debido al aumento del volumen de aguas estancadas y de la temperatura.			X			X
		Enfermedades respiratorias y dérmicas debidas a la sequedad y polvo.				X		X
	Recursos hídricos	Disminución de las reservas de agua y aumento de las restricciones.		X	X	X	X	X
		Reducción de cauces superficiales y mayor duración del estiaje de ríos y arroyos.			X			X
		Contaminación de las reservas de agua y perturbaciones en el equilibrio ecológico de los ríos.		X	X	X	X	X
		Intrusión salina por sobreexplotación del acuífero costero.			X			
		Disminución del nivel de agua freática e impacto en la rentabilidad de las explotaciones de saneamiento de agua freática.			X			
		Aumento de la demanda de agua para el mantenimiento de las áreas verdes urbanas.			X	X	X	
	AGP	Pérdida de tierras aptas para cultivo por falta de humedad, salinización y desertificación del suelo.		X	X	X		X
		Disminución del rendimiento y empeoramiento de la calidad de los cultivos.			X			X
		Disminución de la actividad fotosintética, debilitamiento de las especies de cultivo e incremento de la propagación de enfermedades, hongos y plagas por estrés hídrico.			X			X
		Activación de incendios.		X	X			X
		Cambios en la cantidad o en el tipo de especies piscícolas capturadas.		X				

.../...

.../...

Amenazas	Sectores y áreas amenazadas	Impactos climáticos identificados	COC	COT	CMC	CMCV	CMCI	CMAS
Disminución de precipitaciones	Actividades económicas	Impacto en el sector hotelero y turismo.					X	
		Impacto en el sector industrial por escasez de recursos hídricos.					X	
		Competencia y enfrentamientos entre diferentes colectivos/ sectores por la obtención de recursos hidráulicos.			X	X	X	
	Energía	Ineficiencia de la producción hidroeléctrica debida a los cambios de precipitación y temperatura.					X	
		Reducción en la capacidad de producir recursos geotérmicos de baja temperatura por la disminución del caudal de los acuíferos.					X	
		Interrupción de la actividad de centrales eléctricas por la dificultad de refrigeración debida al estrés hídrico.			X			
	Sociedad	Aumento de precios del agua y los alimentos.			X			
Aumento de temperaturas	Urbanismo	Disminución del confort y habitabilidad en viviendas y/o adopción de soluciones de mala adaptación.		X	X	X		X
		Estrés térmico y reducción del confort térmico en el espacio público.	X	X				
		Deterioro y deformaciones de elementos y materiales de construcción y mobiliario urbano.		X				X
		Afectaciones a las infraestructuras de transporte (por expansividad de arcillas en el terreno, dilatación de carriles ferroviarios, etc.).			X		X	
		Cambios en patrones de uso del espacio y pérdida de valores educativos y de ocio (recreativos, estéticos).		X				
	Ecosistemas	Modificación/pérdida de biodiversidad, desertificación	X		X	X	X	X
		Aparición de plagas y especies invasoras e incremento de la propagación de enfermedades en la vegetación por el debilitamiento de las especies forestales.			X	X	X	
		Reducción de producción vegetal para generar biomasa.					X	
		Activación de incendios forestales.	X		X	X	X	
		Empeoramiento de la calidad del aire.	X	X				

.../...

.../...

Amenazas	Sectores y áreas amenazadas	Impactos climáticos identificados	COC	COT	CMC	CMCV	CMCI	CMAS
Aumento de temperaturas	Salud	Afectación a la salud relacionadas con el estrés térmico (aumento de la mortalidad y la morbilidad), sobre todo en la ciudadanía anciana, infantil, o con enfermedades.		X	X	X	X	X
		Agravamiento de enfermedades cardiovasculares y respiratorias.		X	X	X		X
		Aumento de enfermedades zoonóticas/vectoriales transmitidas por mosquitos (dengue, fiebre amarilla, fiebre del Nilo, chicunguña y fiebre del Zika).		X	X	X		X
		Incremento de la duración y gravedad de las enfermedades alérgicas como el asma, la rinitis, las conjuntivitis alérgicas o alguna dermatitis.		X	X	X		
		Daños en la salud derivados del aumento de los patógenos en el agua o los alimentos (legionela, salmonelosis, etc.).			X	X		
		Aumento de la demanda asistencial y de las desigualdades en el acceso a salud.		X				
		Cambios en los estilos de vida (alimentación, actividad física).		X				
	Recursos hídricos	Eutrofización y/o deterioro de la calidad del agua por el aumento de los patógenos derivados del aumento de la temperatura del agua.			X			X
		Incremento en el coste del tratamiento del agua contaminada por el aumento de la temperatura.		X	X			X
		Incremento de la demanda de agua para consumo y para riego de zonas verdes y parques, ejerciendo presión sobre este recurso y su infraestructura.		X		X	X	X
	AGP	Afecciones a los ciclos de cultivo y modificación/reducción en la producción a consecuencia de la variación de la estacionalidad de la actividad hortícola.			X	X	X	X
		Estrés hídrico/debilitamiento de las especies de cultivo e incremento de la propagación de enfermedades, hongos y plagas.				X		X
		Aumento de los tiempos de riego en la agricultura de regadío y de los gastos asociados.			X			X
		Cambios en la producción forestal, ganadera y piscícola.		X	X			
		Activación de incendios.						X

.../...

.../...

Amenazas	Sectores y áreas amenazadas	Impactos climáticos identificados	COC	COT	CMC	CMCV	CMCI	CMAS
Aumento de temperaturas	Actividades económicas	Impacto en el sector industrial y comercial por el aumento del consumo energético en la producción (procesos, circuitos, zonas refrigeradas...) y otros factores.	X	X		X		
		Afectación a la salud del personal trabajador debido a las condiciones climáticas extremas.		X				
		Impacto en el sector hotelero y turismo.		X		X	X	
		Afecciones por el aumento de turistas (demanda de agua, energía, infraestructuras, zonas verdes y naturales).		X				
		Reducción de la humedad del suelo, aumento de las necesidades hídricas de la agricultura y de los demás sectores, creando una potencial competencia sobre éste.			X			
	Energía	Aumento del consumo energético o modificación de la dinámica de la demanda (picos y medias).		X	X	X	X	X
		Afectaciones a las redes de suministro eléctrico debidas a eventos meteorológicos extremos (activación de incendios forestales).					X	
		Reducción de la capacidad conductiva eléctrica y de la capacidad de generación de energía fotovoltaica por la reducción de la transmisividad atmosférica de la radiación.					X	
	Sociedad	Problemas de suministro de servicios (energía, agua, etc.) en verano debido a los «picos» en la demanda, los incendios...		X				
		Aumento de la demanda de ayuda a grupos vulnerables.		X				
		Cambio en las relaciones sociales y hábitos de ocio, deporte, etc.		X				
		Acentuación de las diferencias sociales (especialmente en el medio rural por el envejecimiento).		X				

.../...

.../...

Amenazas	Sectores y áreas amenazadas	Impactos climáticos identificados	COC	COT	CMC	CMCV	CMCI	CMAS
Olas de calor	Urbanismo	Disminución del confort y habitabilidad en viviendas y/o adopción de soluciones de mala adaptación.	X					X
		Deformaciones de los materiales de construcción.						X
	Ecosistemas	Estrés hídrico de la vegetación y menor crecimiento y supervivencia de vegetación arbórea por la menor disponibilidad de nutrientes en el suelo.	X		X			X
		Alteraciones en la fenología y el crecimiento de organismos.		X				X
		Activación de incendios forestales.	X		X	X		
	Salud	Afectación a la salud relacionadas con el estrés por calor (aumento de la mortalidad y la morbilidad), sobre todo en la ciudadanía anciana, infantil, o con enfermedades.			X	X	X	X
		Agravamiento de enfermedades cardiovasculares y respiratorias por la contaminación del aire.			X	X	X	X
	AGP	Estrés hídrico/debilitamiento de las especies de cultivo e incremento de la propagación de enfermedades, hongos y plagas.			X			X
		Afecciones a los ciclos de cultivo y modificación/reducción en la producción a consecuencia de la variación de la estacionalidad de la actividad hortícola.			X			X
		Activación de incendios sobre las producciones agrícolas.			X	X		X
		Aumento de los tiempos de riego y de los gastos asociados.						X
	Energía	Aumento del consumo energético.			X	X		
		Riesgo de sobrecarga de las centrales eléctricas y redes de distribución, y riesgo de interrupción del abastecimiento debido al aumento de demanda eléctrica para refrigeración.			X			
Vendavales	Urbanismo	Afectaciones a las redes de suministro eléctrico y de gas.			X			
		Perturbaciones en el abastecimiento de combustibles por cierre de puertos y competencia sobre el uso de los recursos.			X			
	Sociedad	Incremento en las primas de peligrosidad de seguros y restricciones contractuales en la cobertura contratada.			X			

Fuente: Elaboración propia.

The impact of urban form on vehicle fuel consumption in Mexican metropolitan areas

In this study we analyze the impact that two measures of the urban form – residential density and the land use diversity index – have on gasoline consumption in households located in metropolitan areas of Mexico. The econometric specification implemented is a modified two-part model that fits the distribution of gasoline consumption, while mitigating the endogeneity bias resulting from residential self-selection. The results from the instrumental variables specification, suggest that after controlling for household characteristics increasing residential density in the vicinity of the household location could increase gasoline consumption while increasing residential density at the metropolitan scale may reduce gasoline consumption. Interestingly, the land use diversity index does not seem to affect gasoline consumption. Put together, these findings are indicative of the potential risk of not taking advantage of high residential densities to, together with other strategies, reduce gasoline consumption in metropolitan areas in Mexico.

En este estudio analizamos el impacto que dos indicadores urbanísticos –la densidad residencial y el índice de diversidad del uso del suelo– tienen en el consumo de gasolina de familias ubicadas en las áreas metropolitanas de México. La especificación econométrica adoptada es un modelo de dos partes modificado con variables instrumentales que se ajusta a la distribución del consumo de gasolina, y mitiga el sesgo de endogeneidad resultante de la autoselección residencial. Los resultados señalan que, teniendo en cuenta las características del hogar, un aumento de la densidad residencial en las áreas próximas a la ubicación del hogar podría incrementar el consumo de gasolina, mientras que aumentar la densidad residencial a escala metropolitana podría reducir dicho consumo. Curiosamente, el índice de diversidad del uso del suelo no parece afectar al consumo de gasolina. En conjunto, estos resultados indican el riesgo potencial de no aprovechar las altas densidades residenciales para, junto con otras estrategias, reducir el consumo de gasolina en las áreas metropolitanas de México.

*Azterketa honetan, bi hirigintza-adierazlek –etxebizitza-dentsitateak, batetik, eta lurzorua-
ren erabileraren dibertsitatearen adierazleak, bestetik– Mexikoko gune metropolitarretan kokatutako
familien gasolina-kontsumoan duten eragina aztertu dugu. Ezarritako espezifikotasun ekonome-
trikoa bi ataleko eredua da, aldagai instrumentalekin aldatua. Hala, gasolina-kontsumoaren ba-
naketara egokitzen da, eta etxebizitzaren autohautaketaren ziozko endogeneotasunaren joera
arintzen du. Emaitzen arabera, eta kontuan hartuta etxearen ezaugarriak, bizilekuaren kokape-
netik hurbil dauden guneetan etxebizitza-dentsitatea igoko balitz, gasolinaren kontsumoa area-
gotu egin liteke; bestalde, eskala metropolitarran etxebizitza-dentsitatea igotzeak kontsumo hori
murriztea eragin lezake. Lurzorua-
ren erabileraren dibertsitateak, bitxia izan arren, ez dirudi ga-
solinaren kontsumoan eragiten duenik. Oro har, emaitza horietan ikus daitekeenez, arriskua
dago etxebizitza-dentsitate altu horiek aprobetxatu ez daitezen, beste estrategia batzuekin batera,
Mexikoko gune metropolitarretan gasolinaren kontsumoa murrizteko..*

David R. Heres

*Associate Professor, Center for Research and Teaching in Economics (CIDE),
and Researcher, Banco de Mexico.*

Rafael Dávila-Bugarín

*Director, Market Conditions, Mexican Federal Institute
of Telecommunications (IFT)*

Table of contents

1. Introduction
2. Data
3. Model
4. Results and discussion
5. Conclusions

References

Keywords: gasoline consumption, compact development, two-part model, travel behavior, residential density, land use diversity index.

Palabras clave: consumo de gasolina, desarrollo compacto, modelo en dos partes, comportamiento de viajes, densidad residencial, índice de diversidad del uso de suelo.

JEL codes: C51, D12, Q35, Q5

Entry date: 2020/05/11

Acceptance date: 2020/05/26

Acknowledgement: The authors thank Isabel Casal-Gonzalez for her assistance in this research and two anonymous referees for their useful comments.

1. INTRODUCTION

The scientific consensus maintains that climate change has already caused observable impacts in natural and human systems and that is expected to largely disrupt these if societies fail to drastically reduce anthropogenic greenhouse gas (GHG) emissions by 2030 (IPCC, 2014). Globally, according to WRI (2019), the transportation sector is the second largest source of GHG accounting for 16% of the total emissions with large differences across country income groups. For example, in the Americas, 28.8% of GHG emissions in Canada and the United States combined originate in the transportation sector, while for the Latin America and the Caribbean region this sector contributes with 14.6%. In Mexico, the focus of our study, the share of GHG emissions generated in this sector is 23.2%, which is closer to that from most developed countries in the continent. Based on the main channel of

change, the measures from a policy portfolio to tackle emissions within the transportation sector could be broadly classified into technological and behavioral. Importantly, either group of measures has the potential to influence and reinforce changes through the other's channel. Among the technological measures, regions have experimented with the introduction of fuel economy standards for vehicles, low carbon fuel standards, green vehicle rebates, and renewable energy portfolios. Among the measures that are aimed to mainly target the behavior of consumers, standout carbon (or fuel) taxes and public transit subsidies that have been widely implemented throughout the globe. While being a less resorted measure among the latter group, driving restriction programs have been increasingly adopted in several metropolitan areas across the world during the last two decades, including cities from high-income countries.¹ As Beaudoin *et al.* (2018) point out, political and economic constraints may preclude the implementation of the most efficient policies to curb down emissions in the transportation sector. Nevertheless, a cost-effective transition towards low carbon economies will necessitate a policy menu indicating the comparative performance of alternative policies under different settings.

In this study we revisit the case of a policy that shares characteristics of both technological and behavioral interventions, as it is intended to reduce emissions from vehicle use through the modification of the built environment that affects people's travel choices. By changing the spatial configuration of trip generators and attractors, this type of intervention has the potential to influence travel decisions in a number of dimensions such as frequency and length of trips, as well as the transport mode chosen. Specifically, we estimate the impact of two indicators of the built environment or urban form - residential density and land use diversity - on gasoline consumption of households located in Mexican metropolitan areas (MAs). Although our study restricts its analysis to a single country, we believe that the lessons that can be drawn from it can be extended to other low and middle-income countries. As they develop the transportation emissions from cities in this set of countries will continue to rise if no major technological and behavioral changes are introduced to affect how people move². Additionally, policies that address transportation GHG emissions have not only the potential to contribute to the global climate crisis but also to bring about improvements in the quality of life at the local level, as some of the most health-threatening pollutants are majorly generated within the transportation sector (WHO, 2018; SEDEMA, 2018) and the most polluted cities are located outside the wealthiest countries.

¹ Studies within the economic literature have questioned the effectiveness of driving restrictions to tackle both emissions overall and atmospheric concentrations of local pollutants. See Zhang *et al.* (2017) for a recent theoretical discussion of driving restrictions and an empirical application to the case of Bogotá, Colombia.

² Among the group of least developed countries, transportation GHG emissions have grown from 0.8% to 2.5% as a share of the total generated between 1990 and 2016 (WRI, 2018).

Within the literature exploring the effects of characteristics of the built environment on travel behavior, the most salient difficulty in correctly estimating their impact is the potential bias that can result from residential self-selection or residential sorting. That is, it is not straightforward to discern whether observed differences in distances driven across individuals are shaped by density and abundance of services, or by the preferences of such individuals who in the first place chose residential locations according to their travel preferences. For instance, people who dislike driving could choose to live in an amenity-rich—and dense—area, which would allow them to move differently through the likes of walking or cycling. These types of areas serve as attractive factors for people who have similar anti-car preferences, while sprawled residential areas conversely may attract people for whom driving does not generate a large disutility. The causal identification of the effect is policy-relevant since as the example illustrates, the resulting travel behavior after an intervention depends on whether the modification of the urban form in fact has an effect on individuals who chose to reside in a car-oriented development. To isolate these drivers of the effect, some studies have turned to econometric tools that address residential sorting or self-selection such that a causal interpretation of the estimated effects estimated can be obtained.

Our study provides new evidence regarding the role of the built environment on travel behavior which has been the subject of an extended decades-long debate as recently documented in Stevens' (2017) meta analysis of the impact of residential density - the most researched indicator of the built environment associated to travel behavior. Based on estimates from almost forty studies, of which only about 25% addressed self-selection bias, Stevens (2017) concludes that the impact of residential density is rather small, especially in light of the complex political process involved in increasing it. However, as argued by Heres and Niemeier (2017), aside from properly modeling self-selection, one major avenue to improve upon the policy implications originated in this literature is to conduct studies in low and middle income countries where this type of intervention may still prove to be cost-effective as their cities grow and populations become wealthier.

In this article, gasoline consumption of households located in fifty-two Mexican MAs is characterized as a function of household socio-demographic attributes and neighborhood characteristics measuring urban form such as residential density and land use diversity. Our paper follows closely the methodology proposed in Heres-Del-Valle and Niemeier (2011) who estimated the impact of residential density, land use diversity and access to public transportation on the distances driven by California households in 2000. After controlling for household characteristics and addressing both the non-linearity in the dependent variable typical of travel surveys (i.e., several observations with no reported vehicle use) and self-selection, they find that the most important variable that impacts driving is residential density. They report that the marginal effect of increasing a household area's density by 10% is to lower the vehicle miles traveled by between 1.4% and 1.9%. However, according to the authors this impact albeit larger than estimated in previous literature, continues to be

low when compared to other policy options such as increasing gasoline prices. Conversely, Ewing and Cervero (2017) argue that the elasticity of driving with respect to gasoline price is within the same range as that for residential density, thus apparently making them comparable in terms of their potential effectiveness. Nevertheless, it is worth noting that gasoline prices can be subjected to, and in fact have had, large variations in the short run in magnitudes that the urban form conversely would not be able to experience due to technological and political constraints.

Our study also joins the literature that had explored travel behavior in the Mexican context, where Galindo *et al.* (2006) show how the creation of new roadways may have improved traffic circulation in the short term but in the long term, the number of trips increased to a higher equilibrium compared to a scenario in which no road network expansion took place (i.e., induced demand). While according to Galindo *et al.* (2006) driving had also increased as income had, Crotte *et al.* (2011) finds as expected that transit ridership falls in Mexico City as income rises by a proportionate amount. In Mexico City the car fleet augmented twofold between 1990 and 2010 (Guerra, 2014), perhaps in part due to an unintended consequence of the driving ban program as documented by Davis (2008). Further evidence on the rise of private motorized travel in Mexico comes from Guerra (2014) who based on two waves of Mexico City's household travel survey reports that vehicle kilometers traveled increased by 33% between 1994 and 2007. The results from Guerra's *et al.* (2018) study exploiting a rich set of metropolitan measures of urban form, suggest that both these measures and transit supply at the metropolitan scale largely determines mode choice across urban areas in Mexico. As proposed in Benito *et al.* (2005), a strategy to isolate the effect of urban form measures from those of underlying travel preferences is to include measures at the MA level. The validity of the approach lies on the fact that it is unlikely that households would choose their location within a MA based on the aggregate urban form of the MA, and that the typical household would not choose to locate on a given MA based on its urban form. While this argument most likely holds, this approach dismisses the large heterogeneity that residential density and land use diversity presents within a given MA. Nevertheless, in our estimations we also include built environment measures at the MA level.

In sum, we consider the present study to contribute to the related literature and policy debate through the estimation of: 1) the impact of the built-environment on both the extensive and intensive margins of travel decisions (i.e., the discrete decision on whether to drive or not, and how much to drive); 2) such impact based on indicators of built-environment at both the MA-level and a finer spatial scale in the context of a middle-income country; 3) such impact from specifications with instrumental variables and indicators at the MA-level as means to correct for the residential self-selection bias. Our results suggest that medium-sized cities experiencing rapid growth have the potential to be intervened such that land use diversification favors travel patterns less dependent on private motorized transportation. However, relying uniquely on this type of policy bears the risk of allowing the forces that drive up gasoline consumption, such as rising incomes, to prevail.

In the remainder of this paper we describe the data used in the econometric analysis, present the econometric model to be estimated, discuss the main results and conclude.

2. DATA

The data used to estimate the model presented in the next section come from three sources from which we generated variables at the level of the household and the census tract where the household is located.³ Specifically, first, household gasoline consumption and household characteristics come from the 2014 National Survey of Household Income and Expenditures (ENIGH, for its initials in Spanish). This survey has been running every two years since 2000 (plus 2005). With modifications to the methodology across the period implemented. This survey collects information regarding socio-demographic characteristics, along with quarterly information regarding households' earnings and expenditures. Its national reach includes all urbanized areas with more than 2,500 inhabitants and rural localities with fewer than 2,500 individuals. For our dependent variable we use the reported gasoline expenditures in households located in any of 52 MAs as defined by CONAPO (2016). We convert expenditures to liters of gasoline consumed in the household based on the average gasoline price during the 30 days before the interview took place as the survey asks for last month's expenditures. Our model controls for households characteristics included in the survey such as age of the household head, household head education, household income, number of household members older than 65, number of household members younger than 2, working household members, and whether a couple lives in the household.

Second, we consider two measures of the built environment as explanatory variables of interest. Residential density was obtained from the 2010 Population and Housing Census (P-Census) and calculated at the census tract level as the number of housing units divided by the census tract area. The number of housing units was also used in the calculation of the variable that represents the land use diversity that approaches 1 (0) as the neighborhood becomes more (less) diverse in their land use. Third, in order to generate this index we also collected data on the number of business units from four different sectors within the census tract from the 2014 Economic Census (E-Census). The sectors are manufacturing, trade, services, and a fourth set that this Census groups together for privacy concerns. The index is brought up from Salon (2015), which itself is a modification of Shannon's Diversity Index calculated as follows:

$$MIX = \left| \frac{\sum_{i=1}^N p_i \ln(p_i)}{\ln(N)} \right| \quad (1)$$

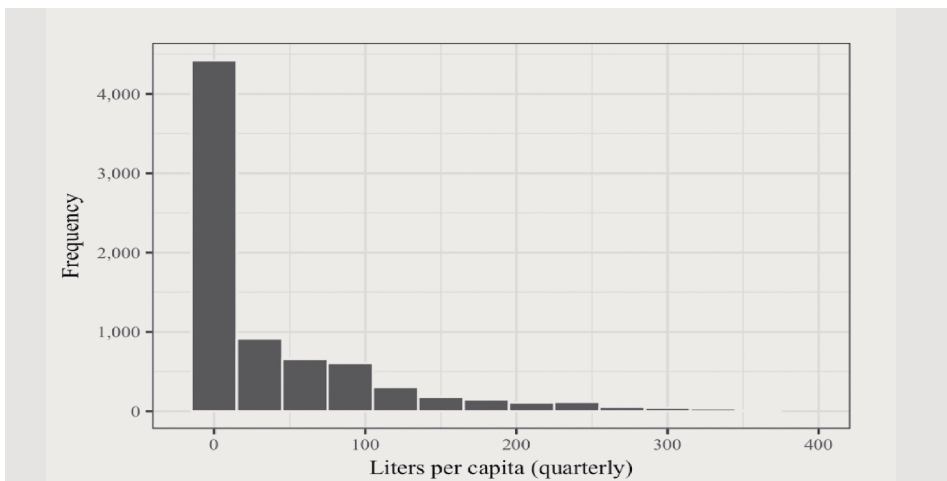
where p_i is the proportion in each of the five categories: housing and the four major economic groups previously mentioned.

³ Here we use the Área Geoestadística Básica (AGEB), which is a Mexican official unit used for statistical purposes and that is similar to the US Census tract.

Lastly, in the instrumental variables specifications (explained below) we exploit another set of variables from the 2010 Population and Housing Census calculated at the census tract level. These variables are the shares of the population who are: a) under 2 years old, b) over 60 years old; and c) percentage of households constituted by a couple.⁴

From Table 1 about 54% of the households in our sample reported no gasoline consumption, while the average quarterly consumption per capita in the whole sample was 46.7 liters (102.3 liters when excluding those households without consumption). Figure 1 shows the highly skewed distribution of quarterly gasoline consumption per capita across the households in our sample, even after removing households that consume more than 400 liters per capita (1% of the sample) not shown in the graph for the sake of clarity. This feature from the data will be addressed in the model specification described in the next section by estimating a two-part model that first estimates the probability of consuming gasoline, and then estimates the amount of gasoline consumed in households that do consume gasoline.

Figure 1. DISTRIBUTION OF GASOLINE CONSUMPTION



Source: Own elaboration based on CONAPO (2016) and INEGI (2014).

⁴ For the sake of comparability between non-instrumented and instrumented estimates, the final sample in all models is restricted to households residing in census-tracts where these three variables were available from the 2010 Population and Housing Census. After this procedure and removing the bottom and upper 1% of households from the income per capita distribution in our initial sample, our final sample comprises data from households located in 52 MA out of the total of 59 MAs defined by CONAPO (2016). The seven MAs not represented in our sample include the five with the lowest MA population and two others that are within the bottom 25 percentile of the MA population distribution in 2010. These are in ascending order of their population (name of state in parentheses): Moroleón-Uriangato (Guanajuato), Acayucan (Veracruz), Teziutlán (Puebla), Rioverde-Ciudad Fernández (San Luis Potosí), Ocotlán (Jalisco), Tianguistengo (Estado de México), and Tula (Hidalgo).

The average household (HH) annual income per capita in our sample is \$47,199 pesos (or about 3,629 USD based on the 2014 average exchange rate) with 16% of HH heads with at least a college degree. The average HH in our sample has at least one member under 2 years old but few have members older than 65 (mean 0.25). Couples live in most households (67%) and typically there is more than one income earner in the sampled HH (mean 1.6).

Table 1. DESCRIPTIVE STATISTICS

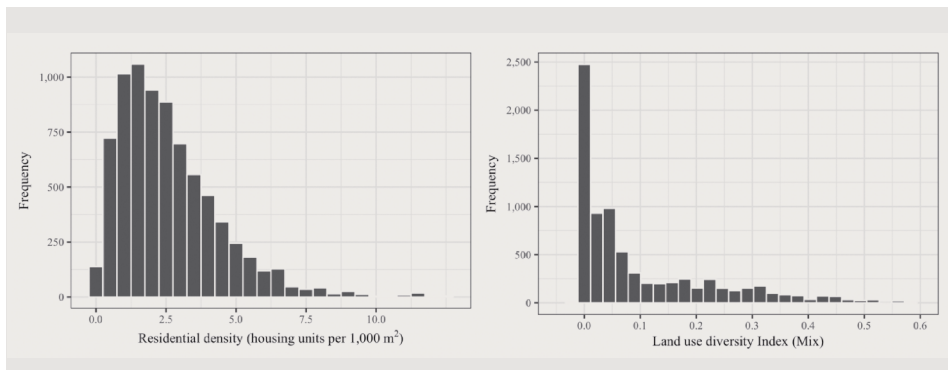
Variable	Variable ID	Mean (std.dev.)	Source
Indicator variable equal to 1 if the household consumed gasoline	consumed	0.46 (0.50)	ENIGH
Gasoline quarterly consumption per capita (liters)	gasoline	46.67 (88.21)	ENIGH
HH annual income per capita (in thousand pesos)	income	47.20 (47.75)	ENIGH
HH head age	age	48.03 (15.18)	ENIGH
HH head education (1= college degree or more, 0 otherwise)	school	0.16 (0.37)	ENIGH
HH members who receive an income	worker	1.62 (1.02)	ENIGH
HH members who are older than 65	age65	0.25 (0.55)	ENIGH
HH members who are under 2 years old	kids	1.19 (1.24)	ENIGH
Indicator variable equal to 1 if a couple inhabits the household	couple	0.67 (0.47)	ENIGH
Indicator variable equal to 1 the household lives in a large MA	zmlarge	0.77 (0.42)	P-Census
Household density in the HH's tract	density	2.61 (1.81)	P-Census
Diversity land use index in the HH's tract	mix	0.10 (0.13)	P-Census and E-Census
Household density in the HH's MA	density_ma	0.78 (0.80)	P-Census
Diversity land use index in the HH's MA	mix_ma	0.13 (0.12)	P-Census and E-Census
Percentage of households inhabited by a couple in the HH's tract	couples_tract	0.79 (0.12)	P-Census
Percentage of population under 2 years old in the HH's tract	age2_tract	0.05 (0.02)	P-Census
Percentage of population older than 60 years old in the HH's tract	age60_tract	0.08 (0.05)	P-Census

Source: Own elaboration.

The two measures selected to characterize the built environment indicate that neighborhoods are poorly mixed in terms of land uses as the average *mix* is close to zero, while the average residential density at the census tract level in our sample is 2.6 housing units per 1,000 squared meters. Average residential density at the MA level is less than 1 unit per 1,000 squared meters (0.78), which in terms of population density⁵ is relatively low compared to large European metropolitan areas but relatively high compared to cities in Canada and United States (OECD).

Figure 2 depicts the distribution of the two measures of built environment at the census tract level, which are highly skewed towards lower levels, more dramatically in the case of *mix*, even after removing the less than 1% of households in our sample that reside in census tracts with a land use diversity larger than 0.6. These same two measures are also used in the analysis but at the MA-level to potentially address self-selection as proposed in Bento *et al.* (2005).

Figure 2. DISTRIBUTION OF BUILT ENVIRONMENT MEASURES



Source: Own elaboration based on CONAPO (2016), INEGI (2010), INEGI (2014) and INEGI (2014b).

Finally, we consider a set of variables describing neighborhood socio-demographic characteristics that may influence residential choice but not travel decisions. From Table 1, 79% of households are inhabited by a couple, and in a typical census-tract 5% of its population is under 2 years old while 8% is older than 60.

⁵ Based on the average household size in our sample (3.7), the average population density at the metropolitan area scale would be 2,886 inhabitants per square kilometer. This density is within the range of that of Donosti-San Sebastian (Spain), Frankfurt (Germany), and Toulouse (France). Mexico City, the most dense city in Mexico, is slightly less denser than Paris (France) but less dense than Barcelona (Spain). Within Latin American cities, the average density of Mexican MAs is only 15% that of Santiago (Chile) and 60% that of Bogota (Colombia). New York City in the United States is half as dense as the average MA in Mexico (OECD, 2020).

3. MODEL

Two characteristics of the data commonly available to estimate the impact of built environment on travel make ordinary least squares not suitable for reaching consistent estimates. First, the large mass of zeroes reported for gasoline consumption (or driving) by households requires specification of non-linear models that address this characteristic of the distribution of the dependent variable. Selection models, latent variable models and two-part models have been proposed to correct for this feature of the data (Cameron and Trivedi, 2005). Second, residential self-selection which has been identified as a key obstacle on the pursue of estimates with causal interpretation has been addressed mainly through the implementation of simultaneous equations models, selection models, joint choice models, attitudinal surveys, including aggregate measures of the built environment and instrumental variables (see Brownstone, 2008; Mohktarian and Cao, 2008 for a discussion of these).

Compared to other approaches, two-part models (2PM) offer a few advantages over other methods that deal with distributions that include a large mass of actual zeroes and censored data. Notably among these, the two outcomes (in our case whether to consume gasoline or not and how much gasoline to consume) can be modeled as separate processes, while the validity of the estimations relies on fewer distributional assumptions and exclusion restrictions, and observations with zero gasoline consumption are not treated as latent (Heres-Del-Valle and Niemeier, 2011; Dow and Norton, 2003, Vance and Hedel, 2007; Vance and Hedel, 2008).

Equation (2) shows the structure of the 2PM in which the first part consists of estimating the probability of using a vehicle ($y > 0$) while the second part estimates the usage level (y) among those who drive in both cases conditional on a set of characteristics x .

$$E[y|x] = \Pr(y > 0|x) \times E[y|y > 0, x] \quad (2)$$

In this study we estimate the first part of the model with a probit model that assumes that the cumulative density function describing $\Pr(y > 0|x)$ is normally distributed. Although in several applications the second part has been modeled with the outcome variable log transformed, Mullahy (1998) shows that transforming back the predictions to levels can be subjected to bias and therefore proposes to model directly the levels of y through an exponential mean model as in equation (3):

$$E[y|y > 0, x] = \exp(x\beta) \quad (3)$$

After assuming the normal cumulative density function in part 1, and substituting (3) in (2), the expected value of y given x under the full M2PM would be:

$$E[y|x] = \Phi(x\alpha) \exp(x\beta) \quad (4)$$

where α and β are respectively the vectors of coefficients estimated in the probit and the exponential mean models and Φ is the cumulative density function of the standard normal. Marginal effects of the variable x_j would be the partial derivative of $E[y|x]$ with respect to x_j as follows:

$$\frac{\partial E[y|x]}{\partial x_j} = \beta_j \Phi(x\alpha) \exp(x\beta) + \alpha_j \phi(x\alpha) \exp(x\beta) \quad (5)$$

where ϕ is the derivative of Φ or the standard normal density. Similarly, the elasticity of gasoline consumption with respect to a variable x_j is calculated as follows:

$$\frac{\partial E[y|x]}{\partial x_j} \times \frac{x_j}{E[y|x]} = \beta_j + \alpha_j \frac{\phi(x\alpha)}{\Phi(x\alpha)} \quad (6)$$

Particular interest in our econometric model lies on the effects of *density* and *land use diversity (mix)* on gasoline consumption controlling for observable household and neighborhood characteristics. Due to the potential bias arising from unobservable characteristics correlated with both the explanatory variables of interest and the outcome variable we propose a model with instrumental variables. An omitted variable bias in this setting originates from the impossibility to observe households' travel mode preferences. In other words, although we observe in which type of neighborhood and how many liters of gasoline per capita are consumed in each household, we do not observe to what extent a given household chose its residential location based on its travel preferences. As the latter are correlated with both the residential location (and thus residential density and land use diversity) and to gasoline consumption, estimates from an econometric model that does not address this endogeneity will be biased and inconsistent.

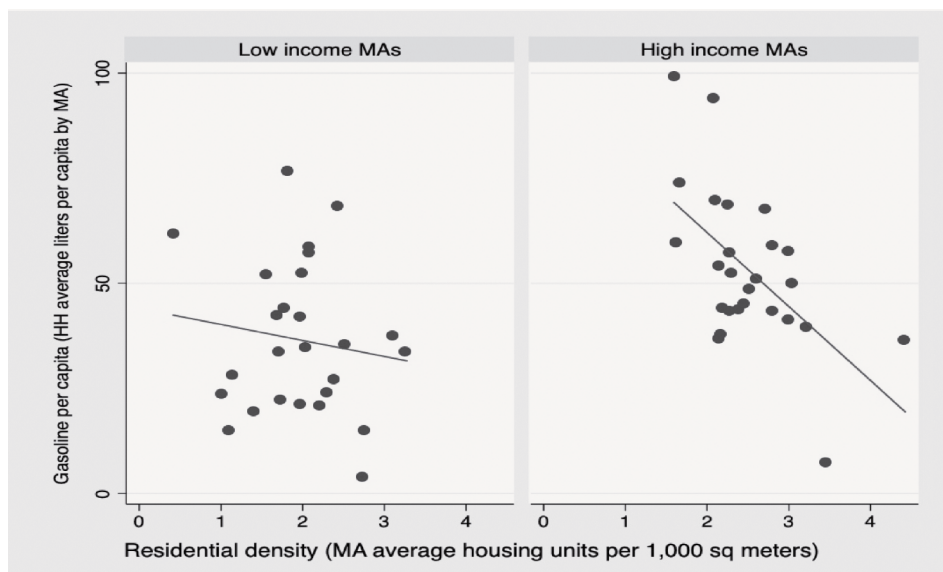
In the next section we contrast estimates from a set of models that ignore self-selection to those from models in which self-selection is addressed either through instrumental variables, built-environment measures at the MA-level (which presumably would not affect residential location choice) or both. In the set of instrumental variables specifications, residential density variable and land use diversity index will be instrumented through a series of neighborhood level characteristics that are expected to influence residential choice but not travel mode choice directly. In sum, to address both the large number of zeroes in the sample and self-selection in the following section we implement a two-part model with instrumental variables (2PM with IV) as proposed in Vance and Hedel (2007) and Heres-Del-Valle and Niemeier (2011). As in the latter we adopt the modified version of the 2PM (M2PM) suggested in Mullahy (1998).

4. RESULTS AND DISCUSSION

Previous sections stressed the importance of correctly identifying the impact of built-environment measures on gasoline consumption in Mexican MAs. As a

preamble to the discussion of results from econometric estimations of the models presented in section 3, we first present the relationship between aggregate MA-level measures of household gasoline consumption per capita and the two variables in our analysis representing the built environment. Figures 3 and 4 show these relationships for two subsets of the 52 MAs, separated by the median MA-level average household income per capita.

Figure 3. **RELATIONSHIP BETWEEN GASOLINE CONSUMPTION AND RESIDENTIAL DENSITY, BY MA**



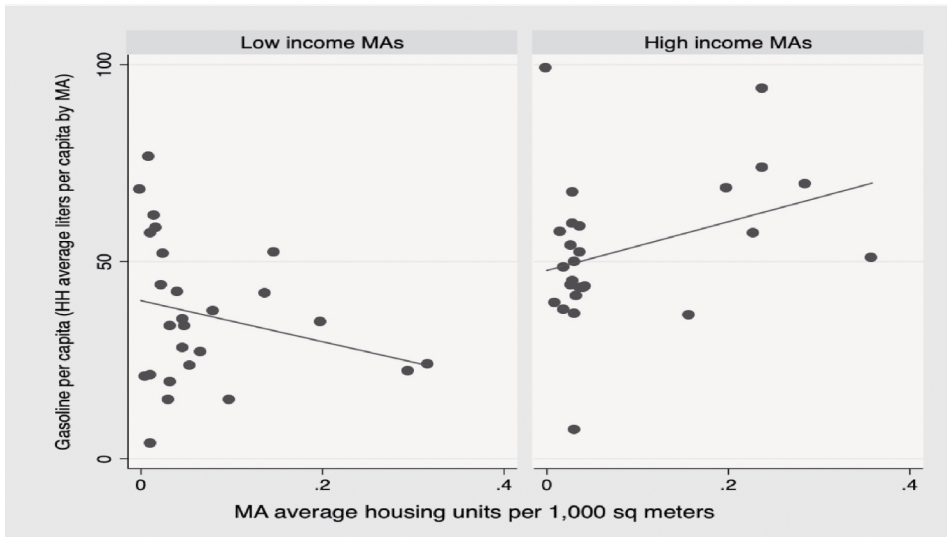
Source: Own elaboration based on CONAPO (2016), INEGI (2010), INEGI (2014) and INEGI (2014b).

Figure 3 suggests a negative association between gasoline consumption and residential density, more clearly in the case of higher income MAs where the downward sloping line seems to closely fit the data points. The interpretation is that households in MAs with higher average census-tract residential density, consume, in average, less gasoline per capita. Oppositely, a higher average land use diversity index does not seem to be associated with reductions in gasoline consumption. Strikingly, the value of this measure for most MAs is close to zero. This feature of the MA-level sample limits the interpretation of the fitted line in the right panel of Figure 4, which would otherwise suggest a positive correlation between gasoline consumption and land use diversity.

In the following we report results from three different specifications for both the modified two-part model (M2PM) and the M2PM with instrumental variables (IVM2PM) exploiting the household-level data. The specifications further differ in the built environment measures included: 1) only residential density at the census

tract-level, 2) only land use diversity index at the census tract-level, 3) both residential density and land use diversity index at the census tract-level, 4) both residential density and land use diversity index at both the census tract-level and MA-level.⁶

Figure 4. **RELATIONSHIP BETWEEN GASOLINE CONSUMPTION AND LAND USE DIVERSITY, BY MA**



Source: Own elaboration based on CONAPO (2016), INEGI (2010), INEGI (2014) and INEGI (2014b).

4.1. Modified Two-Part Model (M2PM): Parts 1 and 2

Table 2 shows results for the first part of the M2PM. Interestingly, in line with what Figures 3 and 4 suggested, residential density (both at the census-tract and MA-levels) is negatively associated with the probability of consuming gasoline. Land use diversity at the census-tract level maintains the opposite relationship with the probability of consuming gasoline in two out of the three specifications in which this variable is included. Nevertheless, the specification that also includes MA-level measures of the built environment as a means to address self-selection indicates that while land use diversity within the census-tract may reduce the probability of consuming gasoline, land-use diversity in the MA may increase it. Common across specifications are the positive statistically significant associations between the probability of consuming gasoline with all control variables except for the number of el-

⁶ All models presented in this section were also estimated for subsets of the sample. Results are qualitatively the same whether we run separate regressions by income quartile, MA size, and MA growth rate. Results are also robust to the inclusion of an interaction between density and mix. Results from these robustness checks are not shown here for brevity but are available from the authors upon request.

derly household members. The signs of these coefficients seem sensible as income, age and education of household head, and the number of household members that work and children would increase the probability of driving to different attractors. On the other hand, as more elderly people inhabit the household, the less likely the household will spend any money on gasoline.

Table 2. **PART 1 OF MODIFIED TWO PART MODEL M2PM (probit)**

Variable	Dependent variable is consumed			
	(1)	(2)	(3)	(4)
density	-0.0509*** (0.00874)		-0.0510*** (0.00874)	-0.0303** (0.00938)
mix		0.318** (0.116)	0.323** (0.116)	-0.416* (0.172)
density_ma				-0.142*** (0.0212)
mix_ma				1.153*** (0.192)
income	0.0103*** (0.000464)	0.0102*** (0.000462)	0.0103*** (0.000464)	0.0104*** (0.000466)
age	0.00835*** (0.00139)	0.00797*** (0.00139)	0.00826*** (0.00139)	0.00874*** (0.00139)
school	0.531*** (0.0478)	0.522*** (0.0476)	0.529*** (0.0478)	0.551*** (0.0481)
workers	0.0751*** (0.0158)	0.0736*** (0.0158)	0.0748*** (0.0158)	0.0787*** (0.0159)
age65	-0.0796* (0.0367)	-0.0750* (0.0366)	-0.0814* (0.0367)	-0.0705 (0.0368)
kids	0.0667*** (0.0143)	0.0682*** (0.0142)	0.0665*** (0.0143)	0.0644*** (0.0143)
couple	0.690*** (0.0356)	0.697*** (0.0356)	0.694*** (0.0357)	0.704*** (0.0358)
zmlarge	0.156*** (0.0371)	0.0957** (0.0367)	0.140*** (0.0375)	0.135*** (0.0381)
constant	-1.701*** (0.0864)	-1.803*** (0.0853)	-1.718*** (0.0866)	-1.778*** (0.0875)
N	7708	7708	7708	7708
Pseudo R ²	0.145	0.142	0.146	0.153

Standard errors in parentheses. * $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$

Source: Own elaboration based on CONAPO (2016), INEGI (2010), INEGI (2014) and INEGI (2014b).

**Table 3. PART 2 OF MODIFIED TWO PART MODEL M2PM
(exponential conditional mean model)**

Variable	Dependent variable is gasoline consumed			
	(1)	(2)	(3)	(4)
density	-0.017* (0.009)		-0.017* (0.009)	-0.003 (0.01)
mix		0.062 (0.118)	0.055 (0.117)	0.066 (0.176)
density_ma				-0.077*** (0.021)
mix_ma				-0.013 (0.169)
income	0.005*** (0.000)	0.005*** (0.000)	0.005*** (0.000)	0.005*** (0.000)
age	-0.005*** (0.001)	-0.005*** (0.001)	-0.005*** (0.001)	-0.005*** (0.001)
school	0.23*** (0.037)	0.229*** (0.037)	0.23*** (0.037)	0.232*** (0.037)
workers	-0.074*** (0.013)	-0.076*** (0.014)	-0.074*** (0.013)	-0.073*** (0.013)
age65	-0.077* (0.035)	-0.075* (0.035)	-0.077* (0.035)	-0.074* (0.035)
kids	-0.224*** (0.014)	-0.223*** (0.014)	-0.225*** (0.014)	-0.222*** (0.014)
couple	-0.181*** (0.036)	-0.178*** (0.035)	-0.18*** (0.036)	-0.177*** (0.036)
zmlarge	0.068* (0.04)	0.053 (0.039)	0.064 (0.039)	0.072* (0.039)
constant	4.895*** (0.081)	4.859*** (0.078)	4.893*** (0.081)	4.881*** (0.083)
N	3,513	3,513	3,513	3,513

Standard errors in parentheses. * $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$

Source: Own elaboration based on CONAPO (2016), INEGI (2010), INEGI (2014) and INEGI (2014b).

Table 3 shows the estimates for the second part of the model in which the two built environment variables at the census-tract level have coefficients that are not

statistically significant suggesting that even though these may impact the decision on whether to drive or not, they do not influence how much driving people do once they drive. Although this is true for census-tract level variables, the last column shows that a higher MA-residential density is associated with lower gasoline expenditures. Among the coefficients for control variables, results indicate that wealthier and more educated households spend more on gasoline. Conversely, negatively associated with the amount of gasoline consumed are the age of the household head and the number of children under 2 years old, both of which can be rooted in safety concerns. Somewhat surprisingly, the coefficient for number of workers in the household suggests that households constituted by more workers tend to spend less in gasoline. This finding, however, may be indicative of a feature of household composition not captured by our set of variables. For instance, two otherwise comparable households based on dimensions other than number of workers, may experience different economies of scale of gasoline consumption: a household with two workers that car-pool together to work will consume less gasoline per capita than a household with one worker that commutes by car from the same origin and destination as the household with two workers.

4.2. **Modified Two-Part Model with Instrumental Variables (IVM2PM): Parts 1 and 2**

A major concern from the previous estimations is that they may be subjected to an omitted variable bias problem due to residential self-selection. To address this concern Tables 4 and 5 present results from the first and second parts of the M2PM with instrumental variables. The instruments which are believed to not directly affect gasoline consumption in a given household are the shares of population in the census tract where the household lives who are under 2 years old, over 60 years old, and the percentage of households within the census-tract where a couple lives. These socio-demographic characteristics of census-tracts may play a role in the choice of residential location but are unlikely to determine travel decisions of a given household. As a counter-example, suppose we instead included the census-tract unemployment rate. Since this could be related in some instances to crime rates, and people may make travel decisions partially influenced by crime rates (Appleyard and Ferrell, 2017), then that variable would not be a good candidate for an instrument. In terms of the relevance and validity of the instruments, that is whether these are related to the endogenous regressors (residential density and land use diversity at the census tract level). Results from respective tests in Table 4 for the probability model indicate that instruments are neither relevant nor valid in specifications that only include *mix*. Conversely, instruments seem to comply with the two requirements in specifications that include *density*, with the exception of the last specification including *density* and *mix* at the MA level. Results for the instrumented second part of the model in Table 5 indicate that the set of instruments are both relevant and valid whenever *density* is included. These tests taken together cast doubt on the potential use of estimates for the variable *mix*.

Table 4. PART 1 OF INSTRUMENTAL VARIABLES MODIFIED TWO PART MODEL IV2PM (probit)

Variable	Dependent Variable is gasoline consumed			
	(1)	(2)	(3)	(4)
density	0.149*** (0.0427)		0.154*** (0.0435)	0.0792* (0.0375)
mix		0.0362 (0.411)	-0.259 (0.434)	0.421 (0.483)
density_ma				-0.231*** (0.0372)
mix_ma				0.458 (0.420)
income	0.0104*** (0.000475)	0.0103*** (0.000463)	0.0104*** (0.000478)	0.0103*** (0.000472)
age	0.00746*** (0.00145)	0.00806*** (0.00140)	0.00755*** (0.00146)	0.00840*** (0.00142)
school	0.517*** (0.0495)	0.522*** (0.0477)	0.518*** (0.0497)	0.536*** (0.0489)
workers	0.0698*** (0.0165)	0.0737*** (0.0158)	0.0697*** (0.0165)	0.0756*** (0.0161)
age65	-0.0549 (0.0384)	-0.0739* (0.0367)	-0.0541 (0.0386)	-0.0652 (0.0376)
kids	0.0770*** (0.0149)	0.0683*** (0.0143)	0.0774*** (0.0150)	0.0703*** (0.0146)
couple	0.716*** (0.0373)	0.694*** (0.0358)	0.715*** (0.0375)	0.726*** (0.0369)
zmlarge	-0.0217 (0.0533)	0.109** (0.0413)	-0.0129 (0.0552)	0.0704 (0.0442)
constant	-2.076*** (0.119)	-1.788*** (0.0874)	-2.073*** (0.119)	-1.935*** (0.106)
CLR (IVs relevance)	13.18 [0.003]	0.00 [0.945]	13.45 [0.002]	5.23 [0.076]
Hansen J-stat (IVs validity)	1.76 [0.414]	14.98 [0.001]	1.42 [0.233]	13.60 [0.000]
N	7708	7708	7708	7708

Standard errors in parentheses. * $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$. The null hypothesis under the conditional likelihood ratio (CLR) test is that the coefficients of the instruments are all zero in the equation of the endogenous variable regressed on all assumed exogenous variables. The null hypothesis under the Hansen J test is that the instruments are uncorrelated with the error term and thus correctly excluded from the main equation. P-values for these tests are shown in brackets.

Source: Own elaboration based on CONAPO (2016), INEGI (2010), INEGI (2014) and INEGI (2014b).

Table 5. PART 2 OF INSTRUMENTAL VARIABLES MODIFIED TWO PART MODEL IV2PM (exponential conditional mean model)

Variable	Dependent variable is gasoline consumed			
	(1)	(2)	(3)	(4)
density	0.134*** (0.036)		0.137*** (0.036)	0.153*** (0.039)
mix		-0.201 (0.473)	-0.297 (0.538)	0.534 (0.542)
density_ma				-0.25*** (0.055)
mix_ma				-0.367 (0.469)
income	0.005*** (0.000)	0.005*** (0.000)	0.005*** (0.000)	0.005*** (0.000)
age	-0.006*** (0.001)	-0.005*** (0.001)	-0.005 (0.001)***	-0.005*** (0.001)
school	0.229*** (0.04)	0.23*** (0.037)	0.23*** (0.04)	0.237*** (0.039)
workers	-0.091*** (0.015)	-0.075*** (0.013)	-0.09*** (0.015)	-0.082*** (0.015)
age65	-0.055 (0.038)	-0.072* (0.035)	-0.048 (0.041)	-0.05 (0.039)
kids	-0.211*** (0.016)	-0.221*** (0.014)	-0.21*** (0.016)	-0.206*** (0.015)
couple	-0.154*** (0.039)	-0.183*** (0.036)	-0.155*** (0.04)	-0.147*** (0.039)
zmlarge	-0.048 (0.052)	0.07 (0.047)	-0.031 (0.058)	-0.002 (0.046)
constant	4.594*** (0.111)	4.87*** (0.083)	4.595*** (0.112)	4.595*** (0.108)
CLR (IVs relevance)	26.84 [0.000]	0.66 [0.418]	27.22 [0.000]	22.22 [0.000]
Hansen J-stat (IVs validity)	0.55 [0.759]	26.51 [0.000]	0.09 [0.763]	2.39 [0.122]
N	3,513	3,513	3,513	3,513

Standard errors in parentheses. * $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$. The null hypothesis under the conditional likelihood ratio (CLR) test is that the coefficients of the instruments are all zero in the equation of the endogenous variable regressed on all assumed exogenous variables. The null hypothesis under the Hansen J test is that the instruments are uncorrelated with the error term and thus correctly excluded from the main equation. P-values for these tests are shown in brackets.

Source: Own elaboration based on CONAPO (2016), INEGI (2010), INEGI (2014) and INEGI (2014b).

In terms of the signs and statistical significance of variables, Tables 4 and 5 show that those for household level characteristics remain as in the non-instrumented specification for both parts of the model. However, the coefficients for residential density at the census-tract level are reversed in all specifications, suggesting, contrary to the leading hypothesis, that higher residential densities may induce more gasoline consumption. Land use diversity is not statistically significant in any of the instrumented specifications for both the first and second parts of the model. In the specifications that instrument for census-tract level built environment variables while also incorporating these same variables at the MA-level, the impact of MA-residential density remains negative as in the non-instrumented specifications.

**Table 6. MARGINAL EFFECTS OF M2PM AND IV2PM
(density and mix at the census tract level)**

	M2PM				IVM2PM			
	Estimate	Std. Err.	[95% Conf. Interval]		Estimate	Std. Err.	[95% Conf. Interval]	
Marginal effects								
density	-2.285	0.449	-3.339	-1.606	9.991	1.877	6.93	14.29
mix	12.549	6.008	0.533	25.352	-19.291	26.232	-69.848	29.472
income	0.508	0.026	0.451	0.559	0.513	0.026	0.459	0.564
age	0.089	0.062	-0.013	0.215	0.039	0.069	-0.083	0.181
school	29.284	2.605	23.899	34.378	28.47	2.848	22.791	34.708
workers	-0.369	0.706	-1.763	0.966	-1.123	0.777	-2.869	0.287
age65	-5.549	1.755	-9.38	-1.894	-3.519	1.999	-7.346	0.427
kids	-6.29	0.679	-7.646	-5.059	-5.295	0.773	-6.631	-3.732
couple	16.036	1.477	13.383	19.369	17.232	1.57	14.367	20.246
zmlarge	6.739	1.679	3.035	9.829	-1.57	2.984	-7.733	3.513
Elasticities								
density	-0.158	0.031	-0.232	-0.112	0.703	0.142	0.475	1.02
mix	0.034	0.016	0.001	0.068	-0.053	0.073	-0.192	0.083
income	0.638	0.029	0.573	0.692	0.653	0.03	0.582	0.702

Standard errors and confidence intervals obtained through 299 bootstrap repetitions.

Source: Own elaboration based on CONAPO (2016), INEGI (2010), INEGI (2014) and INEGI (2014b).

4.3. M2PM and IV2PM: Full effect

Finally, the full marginal effects of the impact of each built environment variable on the amount of gasoline consumed under the specifications with both *density* and *mix* are presented in Tables 6 and 7. The full marginal effect given by equation (5) above represents the expected change in gasoline consumption from a marginal variation in the variable of interest, that is, it predicts the overall change, independently on whether this occurs at the extensive or intensive margins of the decision. Although the calculation of full marginal effects is straightforward from the coefficients estimated in the two parts of the model (equation 5), obtaining standard errors is not. We implemented a bootstrap routine over 299 repetitions to estimate standard errors and a 95% confidence interval for each marginal effect and elasticities for income and all built environment measures.

Table 6 shows marginal effects for both non-instrumented and instrumented specifications that only include built environment measures at the census tract level. Magnitudes and significance levels of all but the built environment variables are comparable across the M2PM and the IVM2PM. However, in terms of elasticities, that for *density* switches from -0.16 in the M2PM to 0.7 in the IVM2PM, while the one for *mix*, albeit not statistically significant, becomes negative in the instrumented specification. This latter result could be due to a lack of variability of the index, which as shown in Figure 2 is highly skewed towards zero and may therefore not be a complete measure of land use diversity.

The results from the instrumented specifications should be interpreted as local average treatment effects. For instance, in the case of residential density, this effect would be applicable to households that chose their residential location based on the set of the assumed exogenous variables, including the share of the population in the census tract that is younger than 2 years old, the share that is older than 60 years old, and the percentage of households inhabited by couples. To the extent that the local average treatment effect estimated by the IVM2PM applies to the entire sample, policy makers should be cautious when increasing residential density in census tracts without promoting other strategies that could directly reduce gasoline consumption as residential density could result in driving increases. The channel through which this counterintuitive result arises remains to be investigated, however, one potential explanation could be that some denser neighborhoods may lack amenities and services such as retail malls, large parks, university campuses and business districts that given their nature require large spaces and thus may result in more driving from households located in denser census-tracts.

Table 7 shows marginal effects for both non-instrumented and instrumented specifications including measures of built environment at the MA level in addition to those at the census tract level. The main difference compared to results from Table 7 is that although residential density at the census tract level remains

positive in the instrumented specification, higher MA residential densities seem to reduce travel. This finding may point to the same channel proposed above by which denser neighborhoods may be mostly occupied by housing. However, denser metropolitan areas may perform better at condensing trip generators and attractors within a metropolitan area even if households must travel across neighborhoods to satisfy their travel needs. The negative impact of denser MAs and positive impact of denser neighborhoods on gasoline consumption seems particularly reasonable for metropolitan areas that have several clusters of trip attractors such that households have options to reach their destinations, even when not necessarily located within their census tract.

Table 7. **MARGINAL EFFECTS OF M2PM AND IV2PM**
(density and mix at the census tract and MA levels)

	Full ZM				IVFullZM			
	Estimate	Std. Err.	[95% Conf. Interval]		Estimate	Std. Err.	[95% Conf. Interval]	
Marginal effects								
density	-1.091	0.482	-2.179	-0.341	7.991	1.722	5.066	11.799
mix	-10.925	8.711	-27.412	6.082	32.364	25.94	-15.023	83.894
dnsity_ma	-7.455	0.979	-9.423	-5.755	-16.203	2.071	-20.618	-12.846
mix_ma	36.602	8.857	18.864	53.038	0.994	22.271	-37.687	43.189
income	0.51	0.025	0.452	0.56	0.502	0.025	0.448	0.55
age	0.112	0.061	-0.003	0.241	0.091	0.064	-0.038	0.219
school	29.969	2.622	24.814	34.542	28.767	2.705	23.075	33.629
workers	-0.19	0.704	-1.504	1.188	-0.612	0.718	-2.185	0.558
age65	-5.029	1.762	-8.826	-1.331	-3.846	1.881	-7.393	-0.255
kids	-6.233	0.684	-7.557	-4.998	-5.248	0.728	-6.55	-3.777
couple	16.35	1.475	13.743	19.468	17.369	1.478	14.966	20.805
zmlarge	6.801	1.68	3.24	10.013	2.102	2.132	-2.345	6.146
Elasticities								
density	-0.076	0.034	-0.153	-0.023	0.577	0.135	0.35	0.896
mix	-0.03	0.024	-0.074	0.017	0.091	0.074	-0.047	0.237
density_ma	-0.156	0.02	-0.194	-0.12	-0.35	0.051	-0.471	-0.272
mix_ma	0.128	0.031	0.065	0.187	0.004	0.081	-0.139	0.158
income	0.645	0.029	0.579	0.692	0.657	0.029	0.587	0.707

Standard errors and confidence intervals obtained through 299 bootstrap repetitions.

Source: Own elaboration based on CONAPO (2016), INEGI (2010), INEGI (2014) and INEGI (2014b).

Importantly, in line with previous literature (Galindo *et al.*, 2006; Crotte *et al.*, 2011), the size of the elasticity of driving with respect to income across all specifications in Tables 6 and 7 is relatively large. The estimate of about 0.65 implies that a doubling of per capita income would in average increase gasoline consumption per capita by 65%. This also highly policy-relevant finding suggests that without any other interventions, gasoline consumption in Mexican MAs will rise at more than half the pace income will.

5. CONCLUSIONS

Societies aiming to become less dependent on carbon will necessarily curb emissions from the transportation sector through policies that affect the carbon intensity of travel, the amount of travel or both. In this study we estimated the impact of modifying the urban form on the probability and amount of gasoline consumption in households located in Mexican metropolitan areas. Through a modified two-part model we found that all else equal, doubling residential density at the neighborhood level would result in 7% less gasoline consumed but 57% *more* gasoline consumed when this variable is instrumented to address self-selection bias. Conversely, and in line with previous literature, our results indicate that increasing residential density at the metropolitan area scale can reduce between 15% and 35% gasoline consumption upon a two-fold increase in residential density. This type of counterfactual (i.e., doubling residential density) may seem highly ambitious in MAs with an already high residential density, but less so in MAs with low residential densities or in their early phases of urban development.

Land use diversity, our other measure of the built environment included in the analysis and presumably more feasible to modify in already built areas, does not seem to affect gasoline consumption. It remains unclear whether this result points to an actual lack of influence on gasoline consumption from this characteristic or to the lack of variability of an index highly skewed towards zero, which could itself originate from a measure that does not fully capture land use diversity.

It is important to note that we cannot discern whether the estimated changes on gasoline consumption upon changes on the explanatory variables are the result of changes in the number of trips, the length of trips, or the fuel-efficiency of the vehicles driven. It is likely that modifications to the built environment would affect all these dimensions of travel. This is particularly important in the context of multidimensional evaluation of alternative policies aimed to tackle multiple externalities from the transportation sector such as road accidents, local and global pollution, and travel time delays.

Although our mixed results on the impact of the built environment suggest avenues for changes on the design and renewal of metropolitan areas that could result in fuel consumption reductions, rising incomes may counteract this effect as the

elasticity of gasoline consumption with respect to this variable was found to be relatively large. Further investigations are required to explore the channels through which fuel consumption may be affected by residential density, land use diversity and other measures of the urban form in the context of low and middle-income countries where motorization rates continue to rise and thus transportation GHG emissions reductions will be limited in spite of technological developments.

REFERENCES

- APPLEYARD, B.; FERRELL, C. (2017): «The Influence of crime on active & sustainable travel: New geo-statistical methods and theories for understanding crime and mode choice», *Journal of Transport & Health*, 6: 516-529.
- BEAUDOIN, J. *et al.* (2018): «Environmental policies in the transportation sector: Taxes, subsidies, mandates, restrictions, and investment», *Working paper*, Cornell University.
- BENTO, A. *et al.* (2005): «The Effects of Urban Spatial Structure on Travel Demand in the United States», *The Review of Economics and Statistics*, 87(3): 466-478.
- BROWNSTONE, D. (2008): «Key Relationships between the Built Environment and VMT», *Special Report 298. Driving and the Built Environment: The Effects of Compact Development on Motorized Travel, Energy Use, and CO2 Emissions*. Washington, DC: Transportation Research Board.
- CAMERON, C.; TRIVEDI, P. (2005): *Microeconomics: Methods and Applications*. Cambridge University Press, Cambridge.
- CONAPO (2016): «Delimitación de las zonas metropolitanas 2010». Accessed January, 2016. <http://www.conapo.gob.mx/en/CONAPO/Zonasmunicipales2010>
- CROTTE, A. *et al.* (2011): «The Role of Metro Fares, Income, Metro Quality of Service and Fuel Prices for Sustainable Transportation in Mexico City», *International Journal of Sustainable Transportation*, 5:1, 1-24.
- DAVIS, L.W. (2008): «The effect of driving restrictions on air quality in Mexico city», *Journal of Political Economy*, 116(1), 38-81.
- DOW, W.; NORTON, E. (2003): «Choosing between and Interpreting the Heckit and two-part models for corner solutions», *Health Services and Outcomes Research Methodology* 4 (1), 5-18.
- EWING, R.; CERVERO, R. (2017): «Does Compact Development Make People Drive Less? The Answer Is Yes», *Journal of the American Planning Association*, 83:1, 19-25.
- GALINDO, L. *et al.* (2006): «Tráfico inducido en México: contribuciones al debate e implicaciones de política pública», *Estudios demográficos y urbanos*, 123-157.
- GUERRA, E. (2014): «The built environment and car use in Mexico city is the relationship changing over time?», *Journal of Planning Education and Research*, 34(4), 394-408.
- GUERRA, E. *et al.* (2018): «Urban form, transit supply, and travel behavior in Latin America: Evidence from Mexico's 100 largest urban areas», *Transport Policy*, 69: 98-105.
- HERES-DEL-VALLE, D.; NIEMEIER, D. (2011): «Co2 emissions: are land-use changes enough for California to reduce vmt? Specification of a two-part model with instrumental variables», *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(1), 150-161.
- (2017): The Past and Future of Research on the Link Between Compact Development and Driving: Comment on «Does Compact Development Make People Drive Less?», *Journal of the American Planning Association*, 83:2, 145-148.
- INEGI (2010): «Censo de población y vivienda», Accessed January 2016. <http://www.inegi.org>.

- mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/Default.aspx
- (2014a): «Encuesta nacional de ingreso y gasto de los hogares», Accessed January, 2016. <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/encuestas/hogares/regulares/enigh/enigh2014/nvc/default.aspx>
- (2014b): «Censos Económicos 2014» Accessed December, 2019. <https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2014/default.html#Tabulados>
- IPCC (2014): «Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change». Geneva, Switzerland, 151 pp.
- MOKHTARIAN, P.; CAO, X. (2008): «Examining the Impacts of Residential Self-Selection on Travel Behavior: A Focus on Methodologies», *Transportation Research Part B: Methodological* 42 (3): 204-28.
- MULLAHY, J. (1998): «Much ado about two: re-considering retransformation and the two-part model in health econometrics», *Journal of health economics*, 17(3), 247-281.
- OECD (2020): The OECD Metropolitan Database. Organization for Economic Co-operation and Development, <https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=CITIES>. Accessed 10 May 2020.
- SALON, D. (2015): «Heterogeneity in the relationship between the built environment and driving: Focus on neighborhood type and travel purpose», *Research in Transportation Economics*, 52, 34-45.
- SEDEMA (2018): «Inventario de Emisiones de la Ciudad de México 2016», DGGCA-DPCAIE. *Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México*.
- STEVENS, M.R. (2017): «Does Compact Development Make People Drive Less?», *Journal of the American Planning Association*, 83:1, 7-18.
- VANCE, C.; HEDEL, R. (2007): «The impact of urban form on automobile travel: disentangling causation from correlation», *Transportation*, 34(5), 575-588.
- (2008): «On the link between urban form and automobile use: Evidence from German survey data», *Land Economics*, 84(1), 51-65.
- WRI (2019): CAIT Climate Data Explorer. 2019. Country Greenhouse Gas Emissions. Washington, DC: World Resources Institute.
- WHO (2018): Ambient (outdoor) air pollution. Fact Sheet. World Health Organization.
- ZHANG, W. *et al.* (2017): «The effects of license plate-based driving restrictions on air quality: Theory and empirical evidence», *Journal of Environmental Economics and Management*, 82: 181-220.

El desarrollo sostenible en los municipios españoles: elaboración de un índice sintético (ISSDS)

Sustainable development in Spanish cities: elaboration of a synthetic index (ISSDS)

Este estudio desarrolla un nuevo indicador sintético a partir de diversas investigaciones de la Red Española de Desarrollo Sostenible. El objetivo es analizar el progreso de las diferentes regiones españolas hacia el Desarrollo Sostenible e identificar los territorios que han mostrado una dinámica positiva en la aplicación de la Agenda 2030. Con este fin, a partir de un conjunto de indicadores que recopilan información sobre el progreso de los diecisiete Objetivos de Desarrollo Sostenible, se ha generado un índice de situación sintética para cada uno de los municipios de la muestra (100 ciudades españolas) siguiendo un método de distancia a la solución ideal. Nuestros resultados muestran cómo la situación en el desarrollo sostenible de las regiones españolas difiere entre sí según su ubicación y sus propias características.

Adierazle sintetiko berri bat garatzen du azterketa horrek Garapen jasangarriaren Espainiako Sarearen hainbat ikerketatik aurrera. Espainiako eskualde guztiek garapen jasangarrirantz egindako aurrerapena aztertzea eta Agenda 2030 aplikatzean dinamika positiboa erakutsi duten lurraldeak identifikatzea ditu helburu. Xede horrekin, Garapen Jasangarriaren hamazazpi Helburuen aurrerapenari buruzko informazioa biltzen duen adierazle-multzo batetik, egoera sintetikoaren adierazle bat sortu da lagingaren udalerrri bakoitzerako (Espainiako 100 hiri), irtenbiderik egokienarekin distantzia-metodo bati jarraituz. Gure emaitzek erakusten dute Espainiako eskualde guztien arteko garapen jasangarriari dagokion egoera desberdina dela kokapenaren eta berezko ezaugarrien arabera.

This study develops a new synthetic indicator from diverse researches by the Spanish Sustainable Development Network. The objective is to analyse the progress of the different Spanish regions towards Sustainable Development and to identify the territories that have shown a positive dynamic in the application of the 2030 Agenda. To this end, from a set of indicators that collect information on the progress of the seventeen Sustainable Development Goals, a synthetic situation index has been generated for each of the municipalities in the sample (100 Spanish cities) following a method of distance from the ideal solution. Our results show how the situation in sustainable development of the Spanish regions differ from each other depending on their location and their own characteristics.

Álvaro de Juanes Rodríguez José Miguel Giner Pérez

*Departamento de Economía Aplicada y Política Económica
Universidad de Alicante*

265

Índice

1. Introducción
2. Metodología
3. El desarrollo sostenible en los municipios españoles: ISSDS
4. Análisis y discusión de los resultados
5. Conclusiones

Referencias bibliográficas

Anexos

Palabras clave: desarrollo sostenible, índice sintético, análisis factorial, regional, Agenda 2030.

Keywords: sustainability development, synthetic index, factorial analysis, regional, 2030 Agenda.

Nº de clasificación JEL: C43, Q01, Q51, R58

Fecha de entrada: 28/04/2020

Fecha de aceptación: 25/05/2020

1. INTRODUCCIÓN

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son la propuesta de continuación a los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) impulsada por Naciones Unidas en septiembre de 2015 mediante la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible; se trata de un plan de acción para conseguir un futuro sostenible y próspero que entró en vigor el 1 de enero de 2016. La Agenda ofrece 17 Objetivos con 169 metas de carácter integrado e indivisible, que incluyen temas de carácter económico, social y ambiental.

Los ODS no son jurídicamente obligatorios, son los gobiernos los que deben establecer leyes y marcos institucionales para su consecución. y la responsabilidad de su implantación, seguimiento y examen de los logros conseguidos en materia de desarrollo sostenible recae en los países. No obstante, las actividades regionales y locales son cruciales para una buena cooperación y contribución a nivel mundial.

Junto a esto, desde Naciones Unidas se recoge anualmente en el Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): «el panorama general de los esfuerzos realizados hasta la fecha para su aplicación en todo el mundo, subrayando las esferas de progreso y las esferas en las que se deben tomar más medidas para garantizar que nadie se quede atrás» (ONU, 2018). En este informe se destaca el avance de los últimos años en las distintas áreas de actuación de los ODS.

Desde la Unión Europea, mediante un firme compromiso en 2016, se ha trazado un camino a seguir en materia de desarrollo sostenible, siendo de las primeras organizaciones supranacionales en aplicar la Agenda 2030 de Naciones Unidas al figurar los ODS en cada una de las diez prioridades de la Comisión Europea. El enfoque estratégico de Europa para promover los Objetivos de Desarrollo Sostenible pasa por la aplicación de unas acciones clave con el fin de implementar la Agenda 2030.

En diciembre de 2017, el Gobierno español emprendió una orientación política para definir la estrategia nacional con el objetivo de cumplir la Agenda de Desarrollo Sostenible 2030. En este Plan de Acción (2018, 2019) se recogen las acciones a seguir por la administración, tanto en la transición de políticas ya existentes como en el arranque de nuevas políticas de Desarrollo Sostenible. Entre ellas destacan: instaurar nuevas políticas públicas, medidas clave para acometer las grandes transformaciones, gobernanza de la Agenda, seguimiento, rendición de cuentas y evaluación. Todas ellas inciden, con especial importancia, en el compromiso de las Comunidades Autónomas (CC.AA.), gobiernos locales y otros actores de la sociedad.

En este contexto, se ha desarrollado un amplio conjunto de herramientas necesarias para medir el progreso de los países en la consecución de los objetivos e identificar las brechas que necesitan más atención. En consecuencia, un referente internacional es el Índice y Base de Datos ODS (Sachs *et al.*, 2017), que ofrece un análisis de desempeño de cada país en la consecución de los 17 ODS.

También es importante considerar el hecho de que estos objetivos no se colocan en una escalera jerárquica, por lo que todos gozan de la misma importancia. Sin embargo, la solución a los problemas globales requiere acciones a nivel local, regional y nacional. En consecuencia, los gobiernos locales desempeñan un papel crucial en el desarrollo de políticas, la orientación de acciones y en la estimulación del conocimiento para contribuir al logro de los objetivos de desarrollo sostenible proyectados. Mientras tanto, las herramientas específicas y apropiadas pasan por auditar las condiciones locales, identificar problemas, tomar las medidas apropiadas y medir el progreso en resultados y, en consecuencia, cumplir con los ODS.

Sin embargo, no hay estudios relevantes para una medición de los ODS a nivel municipal (NUTS 5 en la Unión Europea, Nomenclatura de Unidades Territoriales de Estadística) que se basen en la metodología desarrollada a nivel nacional por la Red de Soluciones de Desarrollo Sostenible (SDSN). Nuestro análisis tiene como objetivo llenar este *gap* de la investigación añadiendo novedades metodológicas.

Los objetivos de nuestra investigación son diseñar y elaborar un indicador sintético de cumplimiento de los ODS a nivel local en el ámbito de España, para así poder clasificar los distintos municipios de la muestra en relación con su grado de cumplimiento; y realizar un análisis territorial de las zonas ‘calientes’ en su situación con el desarrollo sostenible, a fin de poner el foco en las irregularidades que se producen y colaborar con las administraciones marcando el rumbo hacia el que debemos ir. Para ello, este documento se ha organizado en base al siguiente método: recopilación de información, enriquecimiento de la información, creación del índice sintético y análisis exploratorio de vínculos económicos. En el segundo apartado, se apuntan los aspectos metodológicos de la investigación en cuanto a los datos utilizados y la elaboración del índice sintético. El apartado tercero aborda un análisis preliminar del desarrollo sostenible en los municipios españoles a través del índice sintético (ISSDS), mientras que en el apartado cuarto se profundiza en el análisis y discusión de los resultados en base a la robustez y comparación de modelos alternativos y al análisis territorial de la situación en desarrollo sostenible. Por último, se presentan las principales conclusiones de nuestra investigación.

2. METODOLOGÍA

2.1. Fuente de datos: utilización de estudios cuantitativos

Nuestros datos se obtienen del informe «Los Objetivos de Desarrollo Sostenible en 100 ciudades españolas» (Sánchez de Madariaga, García López & Sisto, 2018) de la Red Española para el Desarrollo Sostenible, donde se utilizan 85 indicadores conectados a los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible. En este análisis se evalúa a las cien ciudades españolas de más de 80.000 habitantes y a todas las capitales de provincia.

Desde la propia Red destacan por su especial relevancia algunos documentos de referencia metodológica:

- Assembly, U.G. (2017): Global indicator framework for the Sustainable Development Goals and targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development.
- Stiftung, B. (2018): Sustainable Development Solutions Network. SDG Index and Dashboards Report 2017. Global responsibilities: international spillovers in achieving the goals. 2017.
- ISO (2014): ISO 37120. Sustainable development communities – Indicators for city services and quality of life.
- Prakash, M.; Teksoz, K.; Espey, J.; Sachs, J.; Shank, M.; Schmidt-Traub, G. (2017): US cities SDG Index 2017: The U.S. Cities Sustainable Development Goals Index 2017, Achieving a Sustainable Urban America.
- CASBEE (2015): CASBEE for CITIES 2015. Environmental Performance Assessment Tool for Municipalities.

- ITU-T (2016): Y.4903/L.1603. KPI for smart sustainable cities to assess the achievement of SDG.
- ICity Rate (2018): La classifica delle città intelligenti italiane, settima edizione.
- European Union (2018): Sustainable development in the EU. Monitoring report on progress towards the SDGs in a EU context.

Con el fin de adaptar el informe a la organización territorial española, gran parte de los indicadores han sido adaptados o redefinidos al contexto municipal, teniendo en cuenta los planes y estrategias en materia de desarrollo de cada municipio (Sánchez de Madariaga, García López & Sisto, 2018). En una primera selección, se identifican los indicadores más relevantes para los ecosistemas urbanos desde un punto de vista del desarrollo sostenible y se agrupan por palabras clave en cada ODS. A continuación, se preseleccionan los más habituales y se descartan los que no tienen relación directa con alguna de las metas o son redundantes.

Con esta primera selección de indicadores, se ha realizado una consulta a expertos de cada sector para validar o descartar el proceso de cribado de indicadores y consecuentemente se asocia cada indicador con una meta específica de entre las 169 metas de los 17 ODS. Algunas metas no son consideradas por alguna de las razones recogidas en el informe: la meta se enfoca a nivel supramunicipal y/o la meta no es susceptible de medición a escala urbana. Así, se elabora una lista definitiva de indicadores cuantitativos asociados a cada meta relacionada.

Para el tratamiento de los datos, se sigue la metodología propia de la Red de Soluciones de Desarrollo Sostenible (SDSN) (Stiftung, 2017), y para el índice global de los ODS se normaliza cada indicador utilizando una escala de 0 a 100, siendo 100 la mejor puntuación posible y 0 la peor. Los resultados del informe (Sánchez de Madariaga, García López & Sisto, 2018) muestran un panorama en el que predomina un rendimiento intermedio. Aunque hay ciudades en las que se han dado grandes avances, son pocas las que han alcanzado los Objetivos en varias de las metas.

Se dispone, por tanto, como punto de partida para el análisis, de 85 indicadores (Anexo nº 1) asociados a los 17 ODS para cada una de las 100 ciudades analizadas. En base a las 17 variables generadas para cada ODS, que sintetizan la información de los indicadores analizados, nuestro análisis pretende obtener un índice sintético que permita clasificar las ciudades españolas de más de 80.000 habitantes y a todas las capitales de provincia. Se trata de clasificar cada ciudad para distinguir las áreas de mayor avance en desarrollo sostenible e identificar explicaciones a dicho fenómeno.

2.2. Definición del indicador sintético

Partimos, por tanto, de un amplio número de datos (17 indicadores para 100 municipios españoles), lo que implica un conjunto de datos compuesto por 1683 unidades de información. Con tan extenso número de datos, es necesario sintetizar

la información de los diferentes ODS con objeto de hacerla operativa. Para ello, a partir de estos valores, el procedimiento empleado se puede dividir en dos partes: aplicación de la técnica del análisis factorial y cálculo del índice sintético.

En relación con la primera cuestión, a partir de los valores de las 17 variables disponibles, se aplica la técnica del análisis factorial, que identifica las variables relevantes (Anexo nº 2). En este caso, las 17 variables iniciales se sintetizan en 6 factores que recogen gran parte de la información total. Los 6 factores explican un 68,34% de la varianza del problema original: el primer factor (16,77%), el segundo factor (14,03%), el tercer factor (10,02%), el cuarto factor (9,80%), el quinto factor (8,99%) y el sexto factor (8,74%).

Mediante la matriz factorial de componente rotado se identifican las siguientes relaciones entre las variables originales y los factores extraídos (Anexo nº 3):

- El primer factor recoge principalmente información del decimosegundo ODS, referente a la Producción y al Consumo responsable. Igualmente, este factor obtiene puntuaciones elevadas para el octavo ODS, sobre el Trabajo Decente y el Crecimiento económico; y el cuarto y decimoséptimo ODS, Educación de Calidad y Alianzas para lograr objetivos.
- El segundo factor está relacionado principalmente y negativamente con el tercer ODS, vinculado a Salud y Bienestar. Además, negativamente también, está relacionado con el decimotercer ODS de Acción por el Clima.
- El tercer factor conecta de forma firme y negativa con el noveno ODS de Industria, Innovación e infraestructura. Positivamente se correlaciona también con el decimoquinto ODS, Vida de ecosistemas terrestres.
- El cuarto factor enlaza fundamentalmente con el sexto ODS, que está relacionado con el Agua Limpia y Saneamiento.
- El quinto factor recoge información esencialmente del primer ODS, Fin de la Pobreza. Incluido a esto, correlaciona positivamente con la Reducción de las desigualdades, el décimo ODS.
- El sexto factor está ligado negativamente con el segundo ODS, Hambre Cero. Igualmente, obtiene importantes puntuaciones para el quinto ODS, relacionado con la Igualdad de Género y el decimocuarto ODS de la Vida Submarina.

Hay que destacar que los 17 ODS tienen una considerable información dentro de los 6 factores, aunque hay 3 ODS que no se han nombrado en la anterior lista. Se trata del ODS 7, Energía asequible y No Contaminante, que se recoge en dos factores distintos (factores 1 y 4); el ODS 11, Ciudades y comunidades sostenibles, del que también se recoge información en dos factores (factores 2 y 3); y el ODS 16, Paz, Justicia e instituciones sólidas, cuya información es recogida en tres factores distintos (factores 1, 2 y 4).

Los modelos de decisión con atributos múltiples permiten sintetizar la información disponible. La segunda parte metodológica vinculada a la creación del índice corresponde a la ordenación y la elección de alternativas entre un grupo, donde cada alternativa viene definida por un conjunto de variables informativas del problema de decisión (Hwang & Yoon, 1981). Una de las técnicas empleadas es el método de distancia a la solución ideal, que se basa en asignar a cada alternativa un índice de situación que representa la distancia que la separa de la definida como ideal. Esta vendría dada por aquella ciudad que presenta los mejores valores en los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Para llegar a un índice compuesto o sintético de ODS –independientemente del enfoque de síntesis–, los elementos componentes deberían ponderarse y agregarse. Las diferentes ponderaciones de los ODS individuales pueden tener implicaciones importantes en el rendimiento de los países y en las clasificaciones relativas en un índice de ODS (Booyesen, 2002). Esta cuestión se agrava aún más por el hecho de que los ODS combinan medios políticos (por ejemplo, asistencia oficial para el desarrollo) y fines de política (por ejemplo, esperanza de vida saludable). La literatura identifica cuatro enfoques principales para diseñar pesos:

- Pesos iguales.
- Pesos matemáticos o estadísticos.
- Pesos a partir de la información de expertos.
- Pesos subjetivos/flexibles.

En nuestro análisis, hemos optado por el enfoque de pesos matemáticos o estadísticos. Aunque existe un debate a nivel académico-científico sobre la idoneidad de este enfoque metodológico (Lafortune *et al.*, 2018), se ha decidido implementarlo por las correlaciones observadas entre los indicadores asociados a cada ODS. Por lo que, previamente a la aplicación del método de modelos de decisión con atributos múltiples, y para no caer en redundancias en el estudio, se consideró necesario que las variables escogidas fueran independientes entre sí. Evitando las dependencias dentro del conjunto de variables, conseguimos que no afecte a la validez de los resultados finales. Con este objetivo, se utiliza la técnica de Análisis Factorial como método estadístico que permite solventar este problema, a la vez que proporciona la base de cálculo del índice que clasifica a los municipios españoles en función de los distintos valores del índice. Así, el principal objetivo del análisis factorial radica en determinar un número reducido de factores que puedan representar a las variables originales.

El valor del índice sintético de situación (IS) para cada municipio español se obtiene calculando la distancia euclídea que separa cada municipio de aquel que se considera como «ideal», utilizando las puntuaciones factoriales de cada factor para el cálculo de las distancias. Las puntuaciones factoriales que resultan del análisis factorial no presentan un rango homogéneo, con lo que se homogeneizan registrando el óptimo de cada factor con el valor 1. De igual forma, el proceso de factorización

proporciona el porcentaje de varianza del problema original que cada factor es capaz de explicar. Dichos porcentajes constituyen el conjunto de ponderaciones utilizadas para el cálculo de las distancias euclídeas. El paso final consiste en efectuar una transformación lineal de los valores del índice, asignando el valor 1 al municipio que obtiene el valor más bajo en el cálculo de las distancias. De manera que los municipios que muestren mejor situación en materia de desarrollo serán los que obtengan los valores más elevados del índice sintético, siendo 1 el valor máximo.

3. EL DESARROLLO SOSTENIBLE EN LOS MUNICIPIOS ESPAÑOLES: ISSDS

Una vez aclarada la naturaleza y el tratamiento del análisis realizado, es posible mostrar una serie de resultados de los distintos municipios españoles recogidos en la muestra, para el Índice Sintético de Situación en Desarrollo Sostenible (ISSDS) (Anexo nº 4). Con el fin de facilitar la visualización de los resultados y obtener un análisis más claro y correcto, se examinan los resultados de los municipios que han obtenido valores más elevados y más bajos en el ISSDS. En concreto, se muestran los veinticinco municipios que se sitúan por encima del percentil 75 del valor del ISSDS y, en contrapartida, los que se sitúan por debajo del percentil 25 (Cuadro nº 1). Por tanto, los primeros muestran una mejor situación en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Y los segundos, son aquellos que han obtenido peores valores en el índice sintético.

En concreto, se observa que Soria, perteneciente a la Comunidad Autónoma de Castilla y León, obtiene el valor más elevado del ISSDS. Tras ella, se sitúan Vitoria-Gasteiz, Ávila, León y Huesca. Se puede percibir, cómo tres de estas ciudades con mayor cumplimiento de los ODS (Soria, Ávila y León) pertenecen a la misma Comunidad Autónoma, Castilla y León; aunque en segunda posición se encuentra Vitoria-Gasteiz, de la Comunidad Autónoma del País Vasco; y Huesca, de la Comunidad de Aragón.

En contraposición, de la muestra que hemos tratado, entre los municipios con peor avance en desarrollo sostenible del territorio español se encuentra Melilla, ciudad autónoma que cosecha los peores valores del índice, y, por tanto, con peor situación en materia de Desarrollo Sostenible. El segundo municipio con peor puntuación del ISSDS es Ceuta. Entre aquellas ciudades con menor puntuación les siguen Jerez de la Frontera, El Ejido y Algeciras, pertenecientes a la misma comunidad autónoma, Andalucía.

Cuadro nº 1. MUNICIPIOS ESPAÑOLES CON MEJOR Y PEOR VALORACIÓN DEL ISSDS

Municipio	ISSDS	Municipio	ISSDS
Soria	1,000	Almería	0,308
Vitoria-Gasteiz	0,937	Reus	0,302
Ávila	0,886	San Baudilio de Llobregat	0,302
León	0,846	Sevilla	0,300
Huesca	0,798	Cartagena	0,298
Palencia	0,784	Barcelona	0,293
Girona	0,771	Torrent	0,293
Burgos	0,759	Huelva	0,285
Cuenca	0,740	Elche	0,283
Logroño	0,720	Dos Hermanas	0,282
Gijón	0,712	Cornellá de Llobregat	0,269
Bilbao	0,712	Badalona	0,250
Santiago de Compostela	0,700	Mataró	0,228
Oviedo	0,691	Cádiz	0,217
Salamanca	0,690	El Puerto de Santa María	0,213
Cáceres	0,662	Torrevecija	0,205
Lugo	0,652	Santa Coloma de Gramanet	0,204
Zaragoza	0,648	San Fernando	0,202
Guadalajara	0,643	Lorca	0,192
Alcalá de Henares	0,631	Chiclana de la Frontera	0,175
Segovia	0,627	Jerez de la Frontera	0,173
Tarragona	0,625	El Ejido	0,161
Lleida	0,621	Algeciras	0,140
Fuenlabrada	0,609	Ceuta	0,037
Avilés	0,608	Melilla	0,000

Fuente: Sánchez de Madariaga et al. (2018) y elaboración propia.

En el cuadro nº 2 se muestran los cinco mejores municipios para cada factor (F) generado en nuestro análisis factorial. Las ciudades, a su vez, están destacadas con el color que aparece en el cuadro nº 1, según su posición en el ranking de nuestro índice sintético (ISSDS). De esta submuestra, es importante destacar la composición de los municipios de los Factores 2 y 3.

Cuadro nº 2. **MUNICIPIOS ESPAÑOLES QUE PRESENTAN MEJORES VALORES EN LOS FACTORES GENERADOS**

FACTOR 1	FACTOR 2	FACTOR 3
Pozuelo de Alarcón	Teruel	Lorca
Vitoria-Gasteiz	Soria	Roquetas de Mar
Alcobendas	Lugo	Arona
Madrid	León	El Ejido
Las Rozas de Madrid	Cuenca	Chiclana de la Frontera
FACTOR 4	FACTOR 5	FACTOR 6
Melilla	Soria	San Cristóbal de La Laguna
Marbella	Rivas-Vaciamadrid	Soria
Guadalajara	Coslada	Telde
Telde	Torrejón de Ardoz	El Ejido
Burgos	Fuenlabrada	Lugo

Nota. Color gris claro: municipios mejor valorados por el ISSDS. Color gris oscuro: municipios peor valorados por el ISSDS.

Fuente: Sánchez de Madariaga et al. (2018) y elaboración propia.

Como podemos apreciar en el Factor 2, cuatro de las cinco ciudades con mejor puntuación son municipios de alta valoración del ISSDS, ya que predominan municipios por encima del percentil 75. Aunque es curioso que encabece la lista Teruel, cuya clasificación en el índice sintético se encuentra en sexagésimo cuarto lugar. Como anteriormente hemos destacado, este factor se relaciona principalmente y negativamente con el tercer ODS, vinculado a Salud y Bienestar, y el decimotercer ODS, de Acción por el Clima; por tanto, para su agregación en el índice sintético ha tenido que ser transformado (el valor mínimo se convierte en el valor máximo). Pero incluye correlaciones no tan importantes con: Igualdad de género (+0,37), Reducción de las desigualdades (+0,31), Ciudades y comunidades sostenibles (+0,55), Paz, justicia e instituciones sólidas (+0,52) y Alianzas para lograr los objetivos (+0,34). Todo ello otorga un carácter sumamente social a dicho factor, pero nos indica un factor de gran relevancia a estudiar: los efectos sobre el clima de las decisiones de dichos municipios.

El segundo elemento a destacar es el factor 3, ya que, como podemos observar, los cinco municipios con mejor puntuación en ese factor tienen una mala o baja valoración en el índice sintético. Este tercer factor enlaza fundamentalmente y de manera negativa con el noveno ODS, que está relacionado con la Industria, Innovación e infraestructura. Pero, más allá, existen correlaciones modera-

das que son positivas respecto a los ODS 11 y 15, como son: Ciudades y comunidades sostenibles (+0,57) y Vida de ecosistemas terrestres (+0,70). Con una primera suposición, esto podría implicar decisiones que renuncien a la capacidad productiva y competitiva de las regiones, frente a una más medioambiental y sostenible con la zona.

Sin embargo, también es importante comentar el factor 1, que recoge la mayor parte de la varianza respecto al resto de factores, un 16,77%. No se aprecia una distribución clara de los municipios que forman esta submuestra, aunque todos ellos están por encima de la posición 50 del índice (es decir, superan el percentil 50), a excepción del primero de la lista, Pozuelo de Alarcón, que se encuentra en la posición número 77. Además, todos los municipios componentes pertenecen a la Comunidad de Madrid, a excepción de Vitoria-Gasteiz. El factor se compone principalmente y positivamente con los ODS de mayor carácter económico: Producción y consumo responsables (+0,819) y Trabajo Decente y Crecimiento económico (+0,753). Igualmente, también tienen altas correlaciones positivas con el ODS 4 Educación de Calidad (+0,614) y el ODS 17 Alianzas para lograr los objetivos (+0,674). Indicando un factor con una fuerte correlación a la situación económica de la región.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1. Robustez y comparación de modelos

Una vez identificados los municipios españoles de nuestra muestra que han registrado tanto una evolución más positiva como lo más negativos en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, se aborda un análisis del conjunto de municipios de la muestra con el objetivo de tratar la robustez de los resultados.

Consideramos las características o factores explicativos para la dinámica mostrada en materia de desarrollo sostenible: la media geométrica y la media aritmética de éstos. El objetivo de este análisis es comprobar la robustez calculando el rango medio entre los rankings geométricos y aritméticos de los factores (Anexo nº 5).

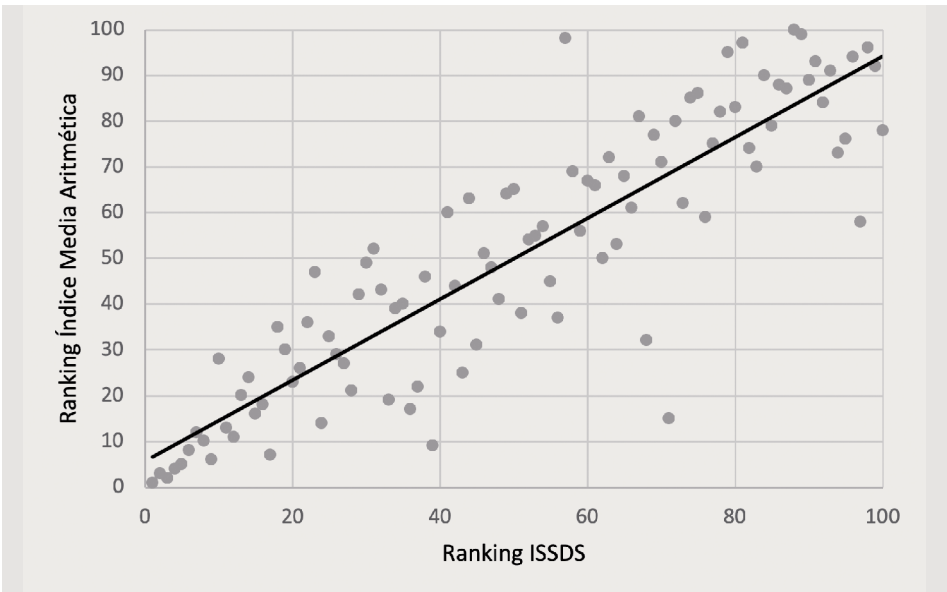
Como se observa en los gráficos nº 1 y 2, los rankings no se ven muy afectados en su distribución por los distintos métodos utilizados. Asimismo, para cuantificar el grado de asociación lineal entre los índices y el ISSDS, se utilizan tanto el coeficiente de correlación de 'Spearman' (ρ) como el de 'Pearson' (p), con el objetivo de determinar si existe una relación lineal entre dos variables a nivel ordinal y que esta relación no sea debida al azar; es decir, que la relación sea estadísticamente significativa. La prueba estadística para ambos casos y ambas variables rechaza la hipótesis de independencia entre ellas, afirmando bajo cualquier nivel de significación que existe una relación entre el Índice de Situación en Desarrollo Sostenible y los índices aritmético y geométrico.

Gráfico nº 1. **RELACIÓN LINEAL ENTRE ISSDS Y RANKING DE LA MEDIA GEOMÉTRICA**



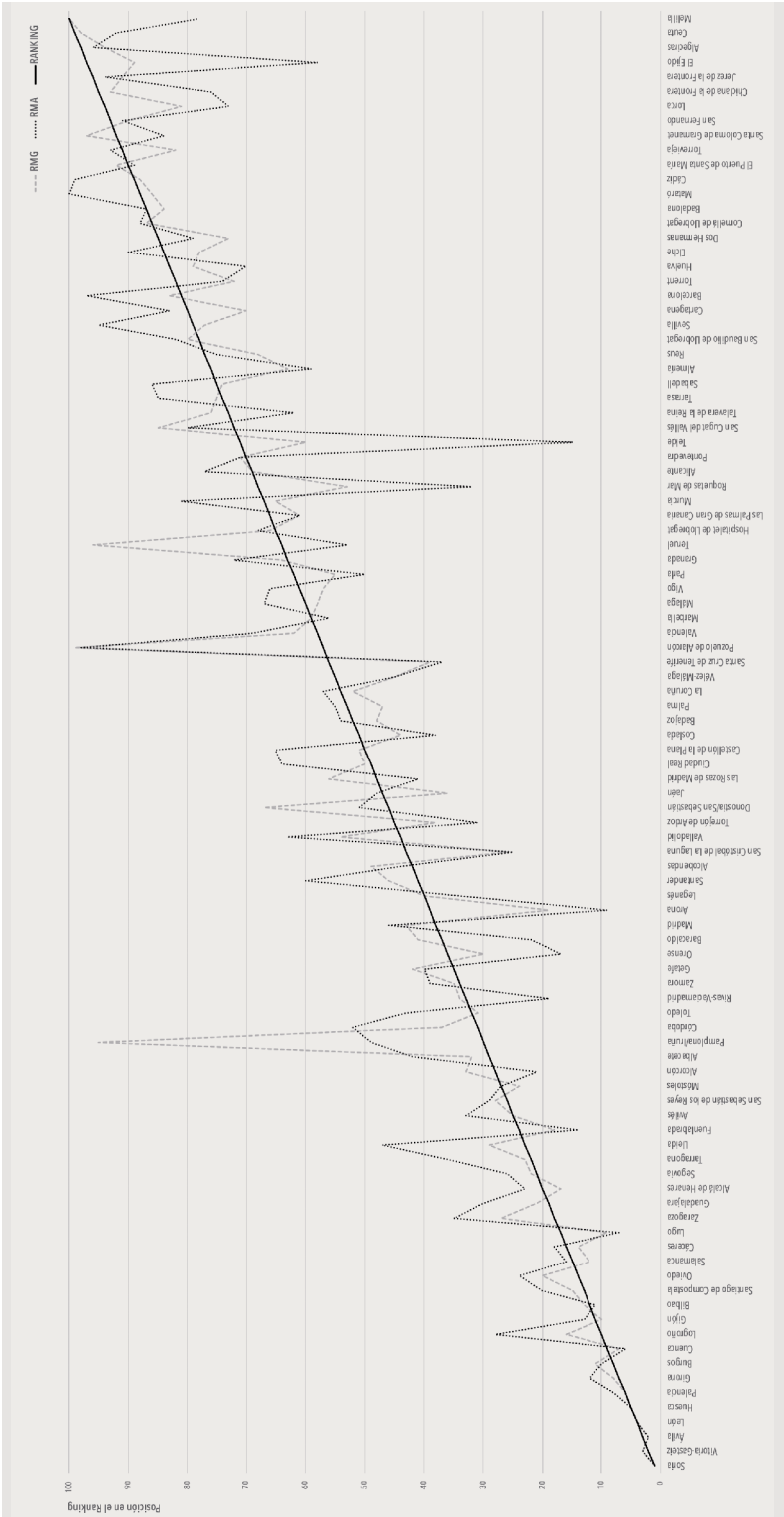
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico nº 2. **RELACIÓN LINEAL ENTRE ISSDS Y RANKING DE LA MEDIA ARITMÉTICA**



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico nº 3. DISTRIBUCIÓN DE LAS CLASIFICACIONES DE LOS ÍNDICES GEOMÉTRICO Y ARITMÉTICO RESPECTO DEL ISSDS



Fuente: Elaboración propia.

No obstante, como se muestra en el gráfico nº 3, la volatilidad entre los rangos es limitada en el caso del ranking creado con la media geométrica; y moderada con el generado mediante la aritmética. Únicamente 10 municipios tienen más de 10 posiciones de diferencia entre el rango geométrico y el rango del ISSDS, con un promedio de 6 rangos de diferencia entre ellos. En el caso de la media aritmética, aumenta significativamente, más de 40 ciudades se ubican por encima de las 10 posiciones de diferencia, pero el promedio continúa en valores asumibles, 10 posiciones entre nuestro índice y la medida aritmética. Estas diferencias se debieron a la propiedad de la media geométrica, que, a diferencia de la media aritmética, tiene la ventaja de reflejar penalizaciones en puntuaciones muy bajas de las variables. En vista de esto, concluimos que los hallazgos son sólidos, logrando un equilibrio entre la solidez científica y la facilidad comunicativa de los resultados.

4.2. Análisis territorial de la situación en desarrollo sostenible

Como segundo objeto de estudio, se ejecuta un análisis del conjunto de municipios de la muestra con el objetivo de tratar características o factores explicativos para la dinámica mostrada en materia de Desarrollo Sostenible, teniendo en cuenta un estudio territorial del índice. Se investiga los vínculos de carácter geográfico que puedan existir entre las submuestras completas de mejor y peor valorados por el ISSDS.

Gráfico nº 4. **MAPA DEL ISSDS EN LAS CIUDADES ESPAÑOLAS DE LA SUBMUESTRA**



Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la localización geográfica de los municipios con mejor y peor valoración del ISSDS, es posible señalar características y elementos de concentración territorial que sirvan para posteriores análisis de clúster. Por un lado, las áreas de mejor situación en Desarrollo Sostenible para el índice sintético están claramente localizadas en el cuadrante noroccidental de la Península. Se puede apreciar una disposición abundante de ‘puntos gris claros’ en las Comunidades Autónomas de Asturias, Castilla y León, Galicia, La Rioja y País Vasco. El eje costero del sureste mediterráneo y la zona litoral del sur de la Península configuran principalmente la densidad de ‘puntos oscuros’, adquiriendo Andalucía, Comunidad Valenciana y Murcia la ubicación de las zonas con peor valoración en Desarrollo Sostenible por el ISSDS.

Las primeras observaciones que se obtienen de la comparación son:

- Las comunidades de la zona con mejor valoración en el índice contienen el 15,06% de la población total, en contraposición con las comunidades de peor valoración, que acumulan un 31,73% de la población española.
- La concentración de ciudades con peor valoración del ISSDS coincide con las áreas de mayor concentración turística de la Península.
- Los territorios de mejor valoración en su situación en Desarrollo Sostenible están entre las comunidades autónomas más afectadas por el abandono de población de sus municipios¹.

Desde la Red Española para el Desarrollo Sostenible, Sánchez de Madariaga *et al.* (2018) destacan que las ciudades españolas logran sus mejores resultados en los ODS 3 (salud y bienestar) y ODS 16 (paz, justicia e instituciones sólidas), seguidos del número 6 (agua limpia y saneamiento) y el número 7 (energía asequible y no contaminante). El ODS número 14 (vida submarina) aparece también entre los mejor situados en aquellas ciudades donde ha sido medido (los municipios costeros o situados en riberas fluviales navegables). Además, los ODS con peores resultados en los municipios son los ODS 8 (Trabajo decente y crecimiento económico), 9 (Industria, innovación e infraestructura), 10 (Reducción de desigualdades) y 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), presentando grandes retos y subrayando la necesidad de hacer un mayor esfuerzo en políticas de apoyo a la innovación y de infraestructura como medios para la reducción de las desigualdades y la creación de modelos urbanos sostenibles. El informe también pone de manifiesto los esfuerzos y avances realizados, dado que 36 ciudades no tienen ningún ODS con valores ínfimos. Algunas ciudades, como San Sebastián, han desarrollado desde hace tiempo políticas activas de crecimiento sostenible e inclusivo, con resultados notables. Otras, como Madrid, Barcelona o Valencia, han iniciado más recientemente el camino, poniendo en marcha planes y medidas específicas.

¹ En Castilla y León, casi el 88% de los municipios de la Comunidad tenían en 2018 menos población que la que registraban en 1998. Fuente: INE, www.ine.es

Es importante matizar el hecho de que un municipio sea referencia en implantar acciones para la sostenibilidad, no siempre se refleja en mejores indicadores a nivel de resultados o desempeño de su situación en desarrollo sostenible (sobre todo, si parte de una situación negativa). Por lo que lo resaltado en el informe de Sánchez de Madariaga coincide con nuestros resultados.

España es un país de un tamaño considerable, con una extensión rural importante, pero con una población escasa en dichas zonas. Esta doble dimensión, en este sentido, se hace evidente a través de nuestros resultados, pero no es de extrañar que las regiones que sufren las consecuencias demográficas y geográficas de este fenómeno experimenten condiciones de vida sostenibles por encima del promedio nacional. Para observar dicho suceso, el gobierno, y más en concreto la Red de Redes de Desarrollo Local Sostenible (constituida en noviembre de 2005 al amparo del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente), propuso el Sistema Municipal de Indicadores de Sostenibilidad (2010); un sistema que puede ser de utilidad para seguir encontrando conexiones entre nuestros resultados y los cosechados por Sánchez de Madariaga.

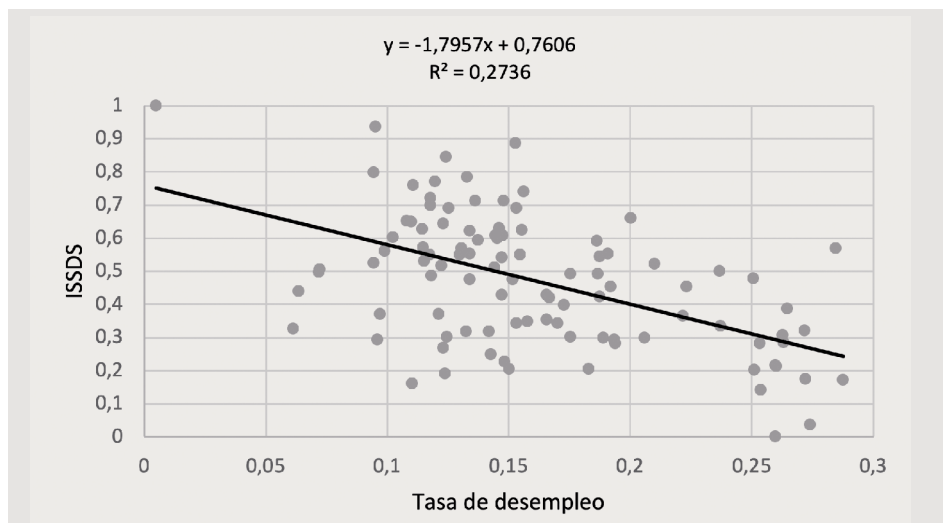
En este sentido, uno de los ODS peor valorados en el conjunto de municipios es el octavo ODS, relativo al Trabajo decente y crecimiento económico. No obstante, aquellos en los que la actividad económica es mayor son los que mejor avance han mostrado en materia de desarrollo sostenible. La población activa es uno de los indicadores que se pueden tener en cuenta para analizar dicho ODS, y es uno de los indicadores propuestos por el Sistema Municipal de Indicadores de Sostenibilidad, *«ya que indica la población potencialmente trabajadora de un lugar determinado y por lo tanto se relaciona con la prosperidad de esa comunidad en un futuro, pues existe una mayor población en condiciones de producir riqueza y consumirla»* RDR/DLS (2010).

En este análisis utilizamos la tasa de paro, también incluida en el sistema anteriormente comentado, porque nos indica cuán común es que dicha población activa no esté equilibrada con la oferta de empleo. Con el objetivo de calcular los datos de población activa de los municipios no incluidos en el proyecto Urban Audit, utilizamos datos del Urban Audit 2018 del INE y microdatos de la Encuesta de Población Activa del mismo año.

Como se observa en el gráfico nº 4, los resultados nos permiten establecer una relación negativa entre la tasa de desempleo del municipio y nuestro índice sintético; en concreto, el coeficiente de correlación obtenido tiene un valor negativo de -0.5231. La prueba estadística para este caso de la 'Rho de Spearman' rechaza la hipótesis de independencia entre ambas variables; los municipios con una tasa de desempleo más alta poseen una peor valoración del ISSDS, lo que coincide con la mayoría de estudios y resultados en relación con este asunto, como en el estudio de la Red de redes de desarrollo local sostenible RDR/DLS (2010) o el informe de Reds, en el que destacan que el ODS 8 (Trabajo decente y crecimiento económico) es uno de los más sensibles al contexto español (Sánchez de Madariaga *et al.*, 2018). Su incidencia sobre el desarrollo sostenible es clara, la comparativa y correlación del desempleo con la creación de des-

igualdades ha sido y sigue siendo objeto de estudio en las investigaciones económicas, y es que sus efectos negativos son acumulativos, y actúan individual y conjuntamente, formando problemas de distintas formas (Sen, 1997).

Gráfico nº 4. **RELACIÓN LINEAL ENTRE ISSDS Y TASA DE DESEMPLEO DEL MUNICIPIO**



Fuente: INE y elaboración propia.

5. CONCLUSIONES

El análisis del progreso urbano en materia de sostenibilidad en la muestra de cien municipios españoles ha mostrado cómo ciertas áreas se encuentran en una situación más positiva en los últimos años respecto a otras. Así, a partir del cálculo de un índice sintético que recoge información de indicadores sobre la situación en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, se ha obtenido una imagen de las áreas con una evolución más deseable en el territorio español. En concreto, la Comunidad Autónoma de Castilla y León registra gran parte de los municipios que han obtenido los valores más elevados en el índice calculado y, por tanto, se sitúa como la región con una situación más positiva en materia de desarrollo sostenible. En contraposición, este análisis también ha mostrado las áreas con peor situación en avance de los ODS: las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla, Andalucía y la Región de Murcia, cuyos municipios tienen pendiente la obtención de avances en políticas sostenibles.

A la vista de lo expuesto, se han encontrado interesantes resultados en la comparación entre territorios de la muestra. Se ha identificado en las zonas de peor valoración del índice una gran concentración del sector turístico. En contraste, algunas zonas de mejor situación en desarrollo sostenible –por ejemplo, municipios

de Castilla y León—, según nuestro estudio, padecen la emigración de población de sus municipios, pero registran mejores resultados en sus tasas de desempleo... En cuanto al análisis territorial de cada ODS, los resultados coinciden con los obtenidos en el análisis de Sánchez de Madariaga *et al.* (2018) y exponen la importancia de: a) crecer de manera inteligente, desarrollando una economía fundamentada en el conocimiento y la innovación, b) crecer de forma sostenible, promocionando una economía baja en carbono, competitiva y eficiente en términos de recursos; y c) crecer inclusivamente, estimulando una economía con un alto nivel de empleo que promueva la cohesión social y territorial. Esto, finalmente, nos debe llevar a considerar la necesaria complicidad de las políticas activas de empleo con la sostenibilidad y el cumplimiento de la Agenda 2030, constituyendo un gran desafío para las Administraciones Públicas.

Es importante que España avance en políticas que acaben con la precariedad laboral y fomenten el crecimiento y desarrollo económico de las regiones. Entender esta diligencia necesaria supone apostar por un desarrollo educativo que produzca beneficios sociales directos en la productividad de las regiones y la creación de empleos dignos. El ISSDS otorga una visión objetiva, contribuyendo en el asesoramiento de las decisiones gubernamentales y el establecimiento de políticas públicas adecuadas.

Las limitaciones de nuestra investigación están relacionadas con los datos utilizados y la metodología abordada. En cuanto a los datos, si bien los datos de partida procedentes del análisis de Sánchez de Madariaga *et al.* (2018) suponen un importante avance en la información cuantitativa del desarrollo sostenible a nivel local, la información disponible a escala local es todavía muy limitada (83 indicadores frente a las 169 metas propuestas por la ONU); algunas metas del desarrollo sostenible se enfocan a nivel supramunicipal y/o en otras metas no es susceptible de medición a escala urbana. Por otra parte, la metodología abordada —aplicación de la técnica del análisis factorial y cálculo del índice sintético— puede conllevar ciertas limitaciones. Sobre todo, en cuanto la aplicación del análisis factorial con un porcentaje de la varianza explicada no muy relevante y con una interpretación de los resultados factoriales que puede ser compleja. No obstante, el índice sintético construido en base al método de distancia a la solución ideal ha mostrado unos resultados bastante coincidentes con otras aproximaciones metodológicas (media aritmética y geométrica).

Por tanto, es importante que en futuras líneas de investigación se puedan superar estas limitaciones. Por un lado, en cuanto a la consolidación de un conjunto más amplio de indicadores a nivel local, y por otro, en la identificación de nuevos indicadores que hallen la relación causa y efecto entre los fenómenos encontrados y diagnostiquen el grado de acomodación de la situación actual de cada municipio, intentando construir un modelo explicativo multivariante del desarrollo sostenible a nivel local. Medir el grado de sostenibilidad de un territorio con criterios objetivos y comparables es el reto al que nos debemos enfrentar, para poder disponer de una poderosa herramienta de diagnóstico que nos ayude en el proceso de toma de decisiones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COMISIÓN EUROPEA (2017): Communication on the next steps for a sustainable European Future. *Recuperado de ec.europa.eu/commission/*
- (2019): Documento de reflexión «Hacia una Europa Sostenible en 2030». *Recuperado de ec.europa.eu/commission/*
- DGBCA (2018): Perfil Ambiental en España 2018. *Recuperado del Ministerio para la Transición Ecológica.*
- GOBIERNO DE ESPAÑA (2019): Plan de Acción para la implementación de la Agenda 2030. *Recuperado de exteriores.gob.es*
- HWANG, C.; YOON, K. (1981): *Multiple Attribute Decision Making. Methods and Applications.* Lecture Notes In Economics And Mathematical Systems, Spinger-Verlag, Berlín Hidelberg, New York.
- LAFORTUNE, G.; FULLER, G.; MORENO, J.; SCHMIDT-TRAUB, G.; KROLL, C. (2018): SDG index and dashboards detailed methodological paper. New York (US): SDSN.
- NACIONES UNIDAS (2018): Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2018. *Recuperado de unstats.un.org.*
- RED DE REDES DE DESARROLLO LOCAL SOSTENIBLE (RDR/DLS) (2010): Sistema municipal de indicadores De Sostenibilidad, Madrid. *Iv Reunión Del Grupo De Trabajo De Indicadores De Sostenibilidad.* *Recuperado De Miteco.gob.es/*
- SACHS, J.; SCHMIDT-TRAUB, G.; KROLL, C.; DURAND-DELACRE, D.; TEKSOZ, K. (2017): SDG Index and Dashboards Report 2017.
- SÁNCHEZ DE MADARIAGA, I.; GARCÍA, J.; SISTO, R. (2018): Informe Urbano: Los Objetivos de Desarrollo Sostenible en 100 ciudades españolas. *Recuperado de reds-sdsn.es*
- SEN, A.K. (1997): From income inequality to economic inequality. *Southern Economic Journal*, 64(2), 384-401.
- STIFTUNG, S.B. (2017): SDG Index and Dashboards Report 2017. Bertelsmann Stiftung and Sustainable Development Solutions Network.
- UNESCO (2015): Replantear la educación. ¿Hacia un bien común mundial?, París. UNESCO.
- VARE, P.; SCOTT, W. (2007): Learning for a change: Exploring the relationship between education and sustainable development. *Journal of Education for Sustainable Development*, 1(2), 191-198.
- VILLAR, A. (2018): Rendimiento, equidad y calidad: el desarrollo educativo en España según PISA 2015. *Cuadernos Económicos de ICE*, (95), 79-97.

ANEXO N° 1

Listado de indicadores del Informe de la REDS**ODS1**

- Ratio 20:20 en desigualdad de renta (Renta disfrutada por el 20% más rico frente al 20% más pobre.) (2007)
- Presupuesto dedicado a servicios sociales y promoción social. (2016)
- Renta declarada por debajo de 6.010 € Precios de consumo de alimentos. (2015)

ODS2

- Superficie de agricultura ecológica frente a la superficie de agricultura total por provincia (2015)
- Beneficiarios previstos en plan de ayuda alimentaria a las personas más desfavorecidas frente al total de la población. (2018)
- Índice de precios de consumo de alimentos a mayo 2018. (2018)

ODS3

- Ratio de muertes por enfermedad de Alzheimer (2016)
- Ratio de mortalidad infantil (2016)
- Ratio de muertes por enfermedad del sistema digestivo (2016)
- Ratio de muertes por enfermedad del sistema respiratorio (2016)
- Ratio de muertes por diabetes mellitus (2016)
- Ratio de muertes por trastornos mentales (2016)
- Ratio de muertes por enfermedad del sistema circulatorio (2016)
- Ratio de muertes por enfermedad infecciosa y/o parasitaria (2016)
- Ratio de muertes por suicidios y lesiones autoinfligidas (2016)
- Ratio de muertes por accidentes de tráfico (2016)
- Ratio de muertes por tumores (2016)
- Esperanza de vida (2016)

ODS4

- Población matriculada en una titulación superior (2014)
- Estudiantes en educación superior por cada 1.000 habitantes (ISCED nivel 5-8 desde 2014 en adelante) (2016)
- Presupuesto dedicado a educación (2016)

.../...

- Proporción de niños de 0-4 años en guarderías sobre la población de 0-4 años (2016)
- Población con nivel de educación secundaria (2011)
- Población con nivel de educación superior (2011)

ODS5

- Brecha de género en la tasa de población activa (2016)
- Brecha salarial en pensiones (2016)
- Brecha salarial en asalariados (2016)
- Número de denuncias por violencia de género por cada 10.000 habitantes (2017)
- Brecha de género en la tasa de desempleo (2016)
- Proporción de mujeres concejales electas en las elecciones municipales (2015)

ODS6

- Balance de ingresos y gastos en la gestión agua (2016)
- Precio del abastecimiento doméstico de agua (2017)
- Precio del saneamiento doméstico de agua (2017)

ODS7

- Demanda de calor y de frío en el sector residencial por año (2017)
- Balance del Presupuesto Municipal para la política de gasto alumbrado público de 2016 frente al de 2012 (2016)
- Balance del gasto medio por hogar en electricidad por comunidad autónoma sobre la renta media anual por hogar (2015)
- Potencia instalada en KW de tecnologías de energías renovables en la provincia frente a la total (2016)
- Tiempo de interrupción equivalente de la potencia instalada en media tensión - TIEPI al año (2016)

ODS8

- Proporción de accidentes laborales con resultado de baja frente al total de afiliados a la S. Social por provincia (2017)
- Tasa de desempleo (2016)
- Tasa de desempleo juvenil (2018)
- Tasa de desempleo de larga duración (2018)
- Producto Interior Bruto (2015)

.../...

.../...

ODS9

- Número de estaciones base UMTS (3G) y LTE (4G) por cada 10.000 habitantes por provincia (2016)
- Número de patentes solicitadas por cada 10.000 habitantes por provincia (2016)
- Tiempo medio de desplazamiento al trabajo (2016)
- Número de comunicaciones de fibra óptica (2016)
- Índice de vulnerabilidad a partir de la diversidad de empleo (2016)
- Presupuesto Municipal para la Política de gasto en I+D+i (Política de gasto 46. Investigación, desarrollo e innovación) (2016)

ODS10

- Ratio de dependencia por edad (Proporción de población entre 0-19 y mayores de 65 frente a la población entre 20-64 años) (2016)
- Concentración de la renta local entre los declarantes con mayores ingresos de cada municipio (1%, 0,5% y 0,1%) (2017)
- Proporción de contratos a personas con discapacidad sobre el total de contratos por provincia (2016)
- Proporción de afiliados a la seguridad social de extranjeros frente al total de extranjeros censados de la provincia (2017)
- Índice Gini (2007)

ODS11

- Superficie del territorio municipal dedicado a zonas verdes e instalaciones deportivas per cápita (2016)
- Proporción del precio de la vivienda libre frente a la renta bruta anual por hogar (2014)
- Concentración de NO₂ (Valor medio de Dióxido de Nitrógeno NO₂ durante el año) (2017)
- Índice de resiliencia urbana (2016)
- Concentración de O₃ (Número de días del año que se ha superado 100 µg/m³ (límite OMS) durante periodos de 8 horas) (2017)
- Uso de transporte sostenible (Proporción entre los desplazamientos al trabajo en transporte público y a pie frente a los desplazamientos en coche) (2011)
- Concentración de partículas PM₁₀ (particulate matter PM₁₀) (2017)
- Vivienda protegida (Proporción entre el número de calificaciones de viviendas protegidas acumuladas desde 1991 hasta 2017 frente al parque total de viviendas) (2017)

.../...

.../...

- Proporción de población que vive secciones censales vulnerables frente al total población (2011)
- Porcentaje de población con acceso a áreas verdes urbanas a 10 minutos andando (2012)

ODS 12

- Cantidad de envases de papel y cartón recogidos por habitante al año (2017)
- Cantidad de envases ligeros recogidos (envases de plástico, envases de metal y *bricks*) por habitante y año (2017)
- Proporción de material de envases recuperado al año frente al total recuperado por provincia (2015)
- Cantidad de vidrio recogido por habitante al año (2017)

ODS 13

- Tasa de emisiones de CO₂ (2008)
- Productividad neta del ecosistema medida mediante la eliminación o liberación de CO₂ a la atmósfera por provincia (2011)
- Índice riesgo de inundación en las áreas urbanas según su exposición natural y su sensibilidad a las inundaciones (2010)

ODS14

- Proporción de playas urbanas con calidad de las aguas excelente frente al total de playas urbanas (2016)
- Proporción de suelo construido en la franja costera de los primeros 10 km frente al total por provincia (2017)
- Proporción de tramos de costa pública del DPMT construida frente al total por provincia (2017)
- Proporción de superficie de costa y hábitats naturales marinos protegidos frente al total por provincia (2017)

ODS15

- Superficie de zonas naturales per cápita (2014)
- Proporción de los espacios naturales protegidos frente al total de la provincia (2014)
- Superficie de zonas verdes artificiales públicas y privadas por municipio per cápita (2009)

ODS16

- Número de infracciones por blanqueo de capitales y tráfico de drogas por cada 100.000 habitantes por provincia (2016)

.../...

.../...

- Número de homicidios dolosos y asesinatos por cada 100.000 habitantes (2017)
- Índice de Transparencia Municipal ITA (2017)
- Proporción de participación en las Municipales de 2015 y Nacionales de 2016 frente al total de población censada (2016)
- Número de victimizaciones de infracciones penales por grupo de edad (0 a 13 años) por 10.000 habitantes (2016)

ODS17

- Presupuesto destinado a proyectos de Cooperación y Ayudas al Desarrollo (2012-2016) per cápita (2016)
- Presencia en redes nacionales de ciudades para lograr objetivos relacionados con el desarrollo sostenible (2018)
- Solidez y autonomía de la Institución municipal (Proporción presupuestaria entre ingresos de recursos propios frente al total de los ingresos) (2016)

Fuente: Sánchez de Madariaga et al. (2018).

ANEXO N° 2

Prueba de KMO y Bertlett del Análisis factorial

Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo		0.613
Prueba de esfericidad de Bartlett	Aprox. Chi-cuadrado	502.073
	gl	136
	Sig.	0

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO N° 3

Matriz de Componente Rotado del Análisis factorial

ODS	1	2	3	4	5	6
Fin de la Pobreza					0.815	
Hambre Cero						-0.757
Salud y Bienestar		-0.878				
Educación de Calidad	0.614		-0.322		-0.367	
Igualdad de Género	0.313	0.367				0.633
Agua Limpia y Saneamiento				0.713		
Energía asequible y No Contaminante	0.406			-0.582		
Trabajo Decente y Crecimiento económico	0.753			-0.313		
Industria, Innovación e infraestructura			-0.833			
Reducción de las desigualdades	-0.4	0.31			0.71	
Ciudades y comunidades sostenibles		0.546	0.568			
Producción y consumo responsables	0.819					
Acción por el clima		-0.748				
Vida submarina						0.616
Vida de ecosistemas terrestres			0.699	0.395		
Paz, Justicia e instituciones sólidas	0.39	0.518		-0.52		
Alianzas para lograr los objetivos	0.674	0.338				

Nota: Solo aparecen los coeficientes de correlación con valores absolutos superiores a 0,300.

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO N° 4

Clasificación de los 100 municipios españoles de la muestra en el ISSDS

1	Soria	1.000	51	Coslada	0.487
2	Vitoria-Gasteiz	0.937	52	Badajoz	0.479
3	Ávila	0.886	53	Palma	0.477
4	León	0.846	54	La Coruña	0.475
5	Huesca	0.798	55	Vélez-Málaga	0.455
6	Palencia	0.784	56	Santa Cruz de Tenerife	0.455
7	Girona	0.771	57	Pozuelo de Alarcón	0.438
8	Burgos	0.759	58	Valencia	0.430
9	Cuenca	0.740	59	Marbella	0.428
10	Logroño	0.720	60	Málaga	0.423
11	Gijón	0.712	61	Vigo	0.421
12	Bilbao	0.712	62	Parla	0.398
13	Santiago de Compostela	0.700	63	Granada	0.386
14	Oviedo	0.691	64	Teruel	0.371
15	Salamanca	0.690	65	Hospitalet de Llobregat	0.370
16	Cáceres	0.662	66	Las Palmas de Gran Canaria	0.365
17	Lugo	0.652	67	Murcia	0.355
18	Zaragoza	0.648	68	Roquetas de Mar	0.348
19	Guadalajara	0.643	69	Alicante	0.344
20	Alcalá de Henares	0.631	70	Pontevedra	0.342
21	Segovia	0.627	71	Telde	0.336
22	Tarragona	0.625	72	San Cugat del Vallés	0.327
23	Lleida	0.621	73	Talavera de la Reina	0.322
24	Fuenlabrada	0.609	74	Tarrasa	0.320
25	Avilés	0.608	75	Sabadell	0.318
26	San Sebastián de los Reyes	0.603	76	Almería	0.308
27	Móstoles	0.601	77	Reus	0.302
28	Alcorcón	0.595	78	San Baudilio de Llobregat	0.302
29	Albacete	0.591	79	Sevilla	0.300
30	Pamplona/Iruña	0.571	80	Cartagena	0.298
31	Córdoba	0.571	81	Barcelona	0.293
32	Toledo	0.568	82	Torrent	0.293
33	Rivas-Vaciamadrid	0.560	83	Huelva	0.285
34	Zamora	0.554	84	Elche	0.283
35	Getafe	0.552	85	Dos Hermanas	0.282
36	Orense	0.551	86	Cornellá de Llobregat	0.269
37	Baracaldo	0.550	87	Badalona	0.250
38	Madrid	0.550	88	Mataró	0.228
39	Arona	0.545	89	Cádiz	0.217
40	Leganés	0.543	90	El Puerto de Santa María	0.213
41	Santander	0.529	91	Torrevieja	0.205
42	Alcobendas	0.526	92	Santa Coloma de Gramanet	0.204
43	San Cristóbal de La Laguna	0.521	93	San Fernando	0.202
44	Valladolid	0.517	94	Lorca	0.192
45	Torrejón de Ardoz	0.510	95	Chiclana de la Frontera	0.175
46	Donostia/San Sebastián	0.506	96	Jerez de la Frontera	0.173
47	Jaén	0.500	97	El Ejido	0.161
48	Las Rozas de Madrid	0.498	98	Algeciras	0.140
49	Ciudad Real	0.493	99	Ceuta	0.037
50	Castellón de la Plana	0.492	100	Melilla	0.000

Fuente: Sánchez de Madariaga et al. (2018) y elaboración propia.

ANEXO N° 5
Diferencias calculadas entre el Ranking del ISSDS y los Rankings creados
con la Media Geométrica y la Media Aritmética

	RANKING	Diferencia con media geométrica	Diferencia con media aritmética
Soria	1	0	0
Vitoria-Gasteiz	2	-1	-1
Ávila	3	1	1
León	4	0	0
Huesca	5	0	0
Palencia	6	0	-2
Girona	7	-1	-5
Burgos	8	-3	-2
Cuenca	9	2	3
Logroño	10	-6	-18
Gijón	11	1	-2
Bilbao	12	-1	1
Santiago de Compostela	13	-2	-7
Oviedo	14	-6	-10
Salamanca	15	3	-1
Cáceres	16	2	-2
Lugo	17	8	10
Zaragoza	18	-9	-17
Guadalajara	19	-2	-11
Alcalá de Henares	20	3	-3
Segovia	21	-1	-5
Tarragona	22	-1	-14
Lleida	23	-6	-24
Fuenlabrada	24	6	10
Avilés	25	0	-8
San Sebastián de los Reyes	26	-2	-3
Móstoles	27	3	0
Alcorcón	28	-5	7
Albacete	29	-3	-13
Pamplona/Iruña	30	-65	-19
Córdoba	31	-6	-21
Toledo	32	1	-11
Rivas-Vaciamadrid	33	-1	14
Zamora	34	-1	-5
Getafe	35	-7	-5
Orense	36	6	19
Baracaldo	37	-4	15
Madrid	38	-5	-8
Arona	39	20	30
Leganés	40	0	6
Santander	41	-5	-19
Alcobendas	42	-7	-2
San Cristóbal de La Laguna	43	17	18
Valladolid	44	-10	-19

.../...

.../...

	RANKING	Diferencia con media geométrica	Diferencia con media aritmética
Torrejón de Ardoz	45	7	14
Donostia/San Sebastián	46	-21	-5
Jaén	47	11	-1
Las Rozas de Madrid	48	-8	7
Ciudad Real	49	-1	-15
Castellón de la Plana	50	-1	-15
Coslada	51	7	13
Badajoz	52	4	-2
Palma	53	6	-2
La Coruña	54	2	-3
Vélez-Málaga	55	10	10
Santa Cruz de Tenerife	56	17	19
Pozuelo de Alarcón	57	-42	-41
Valencia	58	-4	-11
Marbella	59	0	3
Málaga	60	2	-7
Vigo	61	4	-5
Parla	62	7	12
Granada	63	-1	-9
Teruel	64	-32	11
Hospitalet de Llobregat	65	-1	-3
Las Palmas de Gran Canaria	66	5	5
Murcia	67	2	-14
Roquetas de Mar	68	15	36
Alicante	69	0	-8
Pontevedra	70	-1	-1
Telde	71	11	56
San Cugat del Vallés	72	-13	-8
Talavera de la Reina	73	-3	11
Tarrasa	74	-1	-11
Sabadell	75	1	-11
Almería	76	13	17
Reus	77	9	2
San Baudilio de Llobregat	78	-2	-4
Sevilla	79	2	-16
Cartagena	80	10	-3
Barcelona	81	-2	-16
Torrent	82	10	8
Huelva	83	4	13
Elche	84	6	-6
Dos Hermanas	85	12	6
Cornellá de Llobregat	86	-1	-2
Badalona	87	3	0
Mataró	88	2	-12
Cádiz	89	1	-10
El Puerto de Santa María	90	-2	1
Torrevieja	91	9	-2
Santa Coloma de Gramanet	92	-5	8

.../...

.../...

	RANKING	Diferencia con media geométrica	Diferencia con media aritmética
San Fernando	93	3	2
Lorca	94	13	21
Chiclana de la Frontera	95	2	19
Jerez de la Frontera	96	5	2
El Ejido	97	8	39
Algeciras	98	4	2
Ceuta	99	1	7
Melilla	100	0	22

Fuente: Sánchez de Madariaga et al. (2018) y elaboración propia.

ABADIE MUÑOZ, Luis María. Doctor en Economía por la Universidad del País Vasco (UPV/EHU, 2007), ingeniero industrial (UPV/EHU, 1979), graduado en Informática (Universidad de Deusto, 1985) y Máster en Economía Pública (UPV/EHU, 1987). Premio Extraordinario de Doctorado en Ciencias Legales y Sociales. Ha publicado ampliamente en los campos de la energía y la economía del cambio climático en revistas tales como *Energy Economics*; *Energy Policy*; *The Energy Journal*; *Energy*; *Applied Energy*; *Energies*; *Review of Financial Economics*; *Journal of Cleaner Production*; *Science of Total Environment*; *Environmental Research Letters*; *Frontiers in Marine Science*; *FinanzArchiv/Public Finance Analysis*; *Ekonomiaz*; *Dyna*; *Ekaia*; *Water*; *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*; *Environmental Modelling & Software*; *Journal of Environmental Management*; *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*; *Transportation Research Part D: Transport and Environment and Climate Change Economics*; *Water*. Es autor del libro *Investment in Energy Assets Under Uncertainty* (Springer). Es miembro del consejo de redacción de la revista *Dyna Ingeniería e Industria*.

BOSELLO, Francesco. Graduated at the Ca' Foscari University of Venice. He received a Master degree in economics from the University College of London (UK) and a Doctoral degree in economics from the University of Venice. He is presently associate professor of economics at the Department of Environmental Science and Policy at the University Statale of Milan; and affiliate scientist at the Euro-Mediterranean Centre on Climate Change (CMCC) where he coordinates the Economic analysis of Climate Impacts and Policy (ECIP) research division. His main research interests are focused on climate-change policy and modelling. He is currently undertaking research activities concentrated in the area of climate change impact assessment and in the design of optimal mitigation and adaptation strategies developing integrated assessment modelling tools and applied general equilibrium economic models.

CERDÁ TENA, Emilio. Doctor en Ciencias Matemáticas por la Universidad Complutense de Madrid. Catedrático de Fundamentos del Análisis Económico en la Universidad Complutense. Director del Área de Sostenibilidad y Estudios Ambientales en el Instituto Complutense de Estudios Internacionales (ICEI). Ha publicado artículos de investigación en revistas tales como *Spanish Economic Review*; *European Journal of Operational Research*; *Journal of Optimization, Theory and Application*;

Optimal Control, Applications and Methods; Environmental and Resource Economics; Resources Policy; International Journal of Ecological Economics and Statistics; Energy Policy; Energy; DYNA; Energies; Renewable and Sustainable Energy Reviews; Forest Systems; Energy Research & Social Science; Renewable Energy.

DÁVILA-BUGARÍN, Rafael. Director de Condiciones de Mercado en el Instituto Federal de Telecomunicaciones mexicano (IFT), cuenta con el grado de Maestro en Economía por el Centro de Investigaciones y Docencias Económicas (CIDE) y el grado de Licenciado en Matemáticas por la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA). Su campo de investigación son la Competencia Económica, las Telecomunicaciones, las Economía de los Recursos Naturales y la Economía de Género.

DE JUANES RODRÍGUEZ, Álvaro. Graduado en Economía por la Universidad de Alicante, cuenta con un máster en Economía Aplicada por la misma Universidad. Su campo de conocimiento comprende los campos del Desarrollo Sostenible y la nueva era de la Economía Digital, centrándose sus líneas de investigación y publicaciones en metodologías cuantitativas y el desarrollo de indicadores. En este contexto, ha trabajado en entornos investigadores y estratégicos realizando labores de búsqueda de datos, definición de indicadores y análisis de sus propiedades estadísticas a nivel internacional, nacional y municipal.

FOUDI, Sébastien. Doctorado en Economía en la Toulouse School of Economics en 2008. Su especialidad es la economía del medio ambiente y de los recursos naturales. Su investigación se centra en el análisis de la toma de decisiones bajo incertidumbre y los instrumentos, individuales o colectivos para asegurarse contra el riesgo. Su trabajo está aplicado al riesgo de inundación, de sequía, a servicios ecosistémicos, agricultura y energía.

FRASCHINI, Filippo. Post-Doc Research Fellow at the Department of International Economics, Institutions and Development of the Catholic University of Milan, working on climate change adaptation policies and decision methods for climate change strategies. He has a PhD in Institutions and Policies at the Catholic University, with a dissertation on climate change adaptation measures in the tea sector in Rwanda. Filippo developed the analysis of this case study during a visiting period at the Department of Economics of the University of Bath. He is working on climate change adaptation strategies since 2013, when he started his collaboration with Lombardy Foundation for the Environment, a research institution working on environmental policies. During this period Filippo wrote several policy briefs and political strategies for both public administrations and private organizations: the Lombardy Region Climate Change Adaptation Strategy (2014), the Lombardy Region Climate Change Adaptation Plan (2016), the Lombardy Region Climate Change Mitigation Plan (2016), the Climate Change Strategy of Fondazione Cariplo

(an Italian philanthropic organization) and he has been external advisor of the Italian National Climate Change Adaptation Plan (2020).

GALARRAGA GALLASTEGI, Ibon. Investigador en el Basque Centre for Climate Change (BC3) y Director de la empresa Metroeconomica, S.L. Doctor en Economía del Medio Ambiente por la Universidad de Bath (Reino Unido), Master en Economía por la Universidad de Essex (RU) y Licenciado en Economía por la UPV-EHU. Ha trabajado como consultor ambiental para diversas entidades públicas y privadas. Ha sido profesor en la Universidad de Bath y la Universidad Comercial de Deusto y ha publicado en numerosas revistas internacionales de prestigio. Ha participado en proyectos de investigación internacionales y nacionales. Es investigador afiliado de Economics for Energy. De 2005 a 2009 fue Viceconsejero de Medio Ambiente del Gobierno Vasco, Vicepresidente de la Sociedad Pública de medio ambiente IHOBE y miembro del Consejo del Ente Vasco de la Energía (EVE). Desde 2019 es Presidente de la Asociación Española para la Economía Energética (AEEE).

GARCÍA DE JALÓN, Silvestre. Investigador en el Basque Centre for Climate Change (BC3). Es Doctor Ingeniero Agrónomo por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Tiene un máster y doctorado en Economía Agraria y de Recursos Naturales por la UPM. Su tesis doctoral recibió el Premio Extraordinario de Tesis Doctoral de la Escuela Superior de Ingenieros Agrónomos. Su investigación se centra en modelizar los servicios ambientales, económicos y sociales con el fin de evaluar el impacto de las intervenciones políticas que optimizan el uso de los recursos naturales. Anteriormente ha trabajado como investigador postdoctoral en la Universidad de Purdue en los Estados Unidos y en la Universidad de Cranfield en el Reino Unido. Ha participado en varios proyectos de la Comisión Europea y ha publicado numerosos artículos en revistas científicas internacionales de primer nivel. Ha desarrollado varios modelos matemáticos de servicios ecosistémicos y publicado varias librerías en el software R.

GINER PÉREZ, José M^a. Profesor titular del Departamento de Economía Aplicada y Política Económica de la Universidad de Alicante, y Doctor en Ciencias Económicas. Director del Grupo de Investigación «Economía Industrial y Desarrollo Local» y miembro del Instituto Universitario de Investigación de Estudios de Género y del Instituto Universitario de Estudios Sociales de América Latina. Fue Director de la Cátedra de Jóvenes Emprendedores de la Universidad de Alicante. Colaborador activo del Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales, impartiendo docencia en su Programa de Doctorado en Agua y Desarrollo Sostenible y en el Máster de Tecnologías y Políticas Públicas sobre la Gestión Ambiental. Ha sido ponente en numerosos congresos nacionales e internacionales, y es autor de diversas publicaciones en revistas internacionales de reconocido prestigio. También ha participado en diversos proyectos de I+D públicos y privados.

GIRARDI, Giuliano. Licenciado y Master en Ingeniería Energética e Industrial por la Universidad de Padua donde finalizó sus estudios en 2016. Alumno visitante en ICAI-Comillas (2014-2015) donde realizó sus tesis del Master sobre sistemas de energía y cambio climático con el título *La adaptación de los sistemas de energía a los escenarios de cambio climático*. Ha trabajado en varias empresas como Técnico especialista posventa y actualmente forma parte de la estructura de Mitsubishi Electric Hydronics & IT Cooling Systems.

GREÑO, Patxi. Trabaja en Metroeconomica. Es Licenciado en CC. Económicas por la Universidad del País Vasco y Máster en Economía Ambiental por la Universidad de York en Reino Unido. Es experto en análisis económico y diseño de políticas e instrumentos públicos, con especial foco en el área ambiental. Tiene una dilatada experiencia en una amplia gama de métodos de investigación, incluyendo diseño de encuestas y muestreo, análisis estadístico, análisis coste-beneficio, estudios de caso y revisiones sistemáticas de literatura. Asesora a organismos públicos de diferentes niveles territoriales (regional, nacional e internacional) en la elaboración y análisis de sus políticas públicas en ámbitos como la valoración económica de los ecosistemas, la estimación de los costes de la degradación ambiental, el análisis de la contribución del medio marino al desarrollo sostenible o la introducción de instrumentos económicos para promover la reducción de emisiones y el uso eficiente de recursos.

HERES DEL VALLE, David. Investigador afiliado al Banco de México y a la División de Economía del Centro de Investigación y Docencia Económicas (CIDE), en la Ciudad de México. Ha sido profesor visitante en la Universidad del Sur de California, e investigador en el Basque Centre for Climate Change y en el Institute of Transportation Studies, Davis. Cuenta con el grado de doctor en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales por la Universidad de California, en Davis, y es miembro del Sistema Nacional de Investigadores de México. Su obra publicada y en curso se concentra en el análisis de problemáticas económicas, sociales y ambientales mediante métodos econométricos y experimentales. Ha asesorado a agencias gubernamentales e instituciones de desarrollo sobre políticas ambientales, energéticas, de movilidad y de gestión de riesgos ante desastres naturales.

HUNT, Alistair. Senior Lecturer in Environmental Economics at the University of Bath, UK. His research interests particularly relate to the economic valuation of climate change impacts and the economics of adaptation. Alistair prepared UKCIP's costing guidance on adaptation for the UK Government. Alistair was the Coordinator of the EU-funded ECONADAPT project on the economics of adaptation and was a contributor the IPCC 5th Assessment Report (Economics of Adaptation). He has previously worked as an economist in the UK Government and the Rural Development Commission, as well as at Leicester and Nottingham Trent Universities.

LINARES LLAMAS, Pedro. Profesor Propio de Organización Industrial de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI, director de la Cátedra BP de Energía y Sostenibilidad, y co-fundador y director de Economics for Energy. También es investigador del Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) e Investigador Asociado en MIT CEEPR. Actualmente es Director de la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad Pontificia Comillas.

MARTINEZ-JUAREZ, Pablo. Portdoctoral Research Fellow en el Grupo de Economía de la Salud (Health Economics Group) del University of Exeter College of Medicine and Health en la Universidad de Exeter. Comenzó su carrera en la investigación como Research Assistant en el grupo dedicado a salud y cambio climático del Basque Centre for Climate Change (BC3). Realizó su doctorado en la Universidad del País Vasco (UPV/EHU), donde completó su investigación sobre los efectos en la salud de medidas de adaptación al cambio climático basadas en la promoción ambiental. Durante el desarrollo de la tesis, trabajó como investigador en la Universidad de Alcalá (UAH) y como profesor asociado en la Autónoma de Madrid (UAM) impartiendo las asignaturas de Economía de la Información, Economía del Comportamiento y Microeconomía. Ha estado involucrado en diversos proyectos de investigación. Proyectos internacionales como el proyecto del marco H2020 de la Comisión Europea INHERIT (INter-sectoral Health and Environment Research for InnovaTion); o la COST Action IS1204: Tourism, Wellbeing and Ecosystem Services (TObeWELL).

OLAZABAL, Marta. Investigadora principal en el Basque Centre for Climate Change (BC3) y responsable del grupo de investigación sobre Adaptación al Cambio Climático. Estudió Ingeniería Ambiental en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao y es Doctora en Economía Territorial por la Universidad de Cambridge. Su investigación se centra en la planificación y toma de decisiones sobre resiliencia y sostenibilidad urbana y en la evaluación de procesos de planificación climática. Ha trabajado en varios centros vascos y realizado estancias internacionales en Alemania, Reino Unido, Países Bajos, Canadá y Portugal. Su trabajo más reciente está financiado por AXA Research Fund e investiga el grado de preparación al cambio climático de las 136 ciudades costeras más grandes del mundo. Es miembro del Comité Directivo de IPAM (International Platform for Adaptation Metrics) y contribuye al nuevo informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) de Naciones Unidas.

OSÉS-ERASO, Nuria. Doctora en Economía por la Universidad Pública de Navarra (UPNA) y Licenciada en Economía por la Universidad de Navarra. Es profesora en la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales de la UPNA y vicedecana en dicha Facultad desde abril de 2016. Forma parte del instituto de investigación INARBE. Sus líneas de investigación se desarrollan en el ámbito de la economía ambiental, la economía de los recursos naturales y la economía experimental. Ha participado en varios proyectos de investigación y ha publicado su investigación en revistas como *Ecological*

Economics, Journal of Environmental Economics and Management, Environmental and Resource Economics, Experimental Economics, Land Use Policy o Water Resources Research. Premio AERNA al mejor artículo publicado en 2010.

PARRADO MOSCOSO, Ramiro. M. Researcher at RFF-CMCC European Institute on Economics and the Environment (EIEE), Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC), and Università Ca' Foscari of Venice. His main research fields are economics of climate change impacts and policy assessment. Currently involved in several European Commission's Horizon 2020 projects, has also collaborated with the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). Ramiro has been Senior Researcher for the Climate Change and Sustainable Development Research Programme at the Fondazione Eni Enrico Mattei, visiting researcher at the Centre for European Economic Research/Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH (ZEW) in 2010, and a Guest Researcher for the Ecological and Environmental Economics Programme at The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics in 2006. Ramiro holds a PhD in Science and Management of Climate Change from Ca' Foscari University of Venice, a Master Degree in Economics from the Universidad Andina Simón Bolívar in collaboration with the econometrics department of the Université de Genève, and a Degree in Economics at the Universidad Católica Boliviana.

ROMERO MORA, José Carlos. Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad Pontificia Comillas, donde ejerce como profesor del Departamento de Organización Industrial de la Escuela de Ingeniería ICAI, y como investigador en el Instituto de Investigación Tecnológica (IIT). A lo largo de su carrera ha participado en proyectos de investigación y consultoría relacionados con indicadores de sostenibilidad energética a nivel urbano, regional y nacional; con la adaptación del sistema energético al cambio climático; con estudios de pobreza energética en España y con el análisis de escenarios energéticos futuros. Además de las actividades investigadoras relacionadas con el Instituto de Investigación Tecnológica, coordina la Cátedra de Energía y Pobreza, y colabora con la Cátedra BP de Energía y Sostenibilidad.

RUIZ-GAUNA RUIZ DE LOIZAGA, Itziar. Doctora en Economía (Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea, 2017), Máster en Desarrollo Económico y Políticas Públicas (Universidad Autónoma de Madrid, 2011) y Licenciada en Economía (Universidad Autónoma de Madrid, 2010). Realizó la tesis doctoral en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (2013-2016) y, durante ese periodo, efectuó una estancia en la Universidad de California, Berkeley. Actualmente trabaja como consultora senior en Metroeconomica S.L. Su campo de especialización es la economía ambiental: más concretamente la contabilidad nacional verde, los métodos de preferencias declaradas y los modelos de optimización dinámica. También ha trabajado en el análisis y valoración de impactos de políticas públicas.

RUIZ DE GOPEGUI ARAMBURU, María. Arquitecta y urbanista especializada en gestión y resiliencia urbana, adaptación climática y diseño paisajístico (Universidad de Navarra, 2011). Con experiencia en proyectos de diseño y planificación urbano-paisajística basados en conceptos de sostenibilidad y regeneración urbana en España, Portugal y México, en 2018 completó un Máster en Gestión y Desarrollo Urbano de IHS, Erasmus University Rotterdam (Países Bajos), bajo la especialización de Gestión Ambiental Urbana y Cambio Climático. Actualmente trabaja como investigadora en BC3 – Basque Centre for Climate Change analizando el progreso de las políticas de adaptación climática de ciudades costeras, así como colaborando en el diseño de procedimientos para integrar la Estrategia Vasca de Cambio Climático (Klima 2050) en los procesos de planificación urbana.

SAINZ DE MURIETA ZUGADI, Elisa. Licenciada en Ciencias Geológicas por la Universidad del País Vasco (UPV/EHU, 2001), estudió un máster en Ingeniería y Gestión Medioambiental en la Escuela de Organización Industrial de Madrid (EOI, 2002) y trabajó durante tres años en el grupo industrial ULMA. En 2005 entró a formar parte del Departamento de Medio Ambiente del Gobierno Vasco como Directora de Biodiversidad. Durante esta etapa tuvo la oportunidad de ver de primera mano la importancia de la ciencia como base para la toma de decisiones, por lo que al final de su periodo en el Gobierno decidió estudiar un Máster sobre cambios ambientales (UPV/EHU, 2010), que le dio acceso a doctorado. Elisa se unió a BC3 en 2010, donde ha realizado su tesis doctoral (2016). De 2017 a 2019 fue, gracias a una beca postdoctoral del Gobierno Vasco, Investigadora Visitante del Grantham Research Institute (London School of Economics). Actualmente es investigadora del Basque Centre for Climate Change (BC3), donde se ha especializado en el estudio de los impactos del cambio climático desde una perspectiva socioeconómica, así como el análisis de políticas de adaptación y trabaja en el marco de varios proyectos de investigación (COACCH, Gobernadapt).

SMID, Marek. Background in Applied Ecology (MSc. degree at Czech University of Life Science) and GIS and Remote Sensing (MSc. degree at Cranfield University). He also holds PhD from Marie Skłodowska-Curie Joint doctorate in field of Urban Climate. His thesis was focused on Heat Waves and their future impacts in large agglomerations and he graduated with distinctions. Marek also has working experience from UK Environmental Agency – the Geomatics Group and the Joint Research Centre of European Commission. At JRC-EC he worked on analyses of desertification at global scale. Currently, Marek works at BC3 – Basque Centre for Climate Change on a COACCH project – large European Horizont2020 project focused on future health impacts of extreme heat.

EKONOMIAZ

ÚLTIMOS NÚMEROS PUBLICADOS

73. Nueva política de transporte para el siglo XXI. La respuesta al reto de la sostenibilidad
74. Gobernanza y competitividad territorial
75. Eco-innovación. Más allá de los factores, la productividad de los recursos naturales
76. Prospectiva y construcción de futuro
77. La nueva economía institucional
78. Industrias culturales y creativas en la sociedad del conocimiento desigual
79. El cooperativismo ante la globalización
80. De la nueva gestión pública a la gestión pública innovadora
81. Estado de bienestar y gobierno multinivel
82. Europa: futuribles económicos y políticos
83. Estrategias de especialización inteligente
84. Banca y crecimiento regional
85. La previsión social complementaria. Papel y claves de desarrollo
86. La productividad. Tendencias y factores explicativos
87. Crisis salarial, paro y desigualdades. ¿Cuál es el futuro del empleo?
88. El sistema fiscal a debate. Competitividad, equidad y lucha contra el fraude
89. Renacimiento industrial, manufactura avanzada y servitización
90. Tamaño empresarial y crecimiento en tiempo de crisis
91. Economía feminista. Enfoques y propuestas
92. Papel de la universidad en el desarrollo regional
93. Servicios Públicos de Empleo. Análisis y perspectivas
94. La Formación Profesional y las Estrategias de Especialización Inteligente
95. Internacionalización de la empresa mediana y liderazgo en los mercados mundiales
96. Envejecimiento y cambios demográficos

PRÓXIMOS NÚMEROS

- 35 *Aniversario EKONOMIAZ*
(La huella de la Gran Recesión en Euskadi. Impactos y retos de país)
98. Digitalización en la economía y sociedad vasca (II-2020)
 99. Transición energética (I-2021)
 100. Crecimiento inclusivo (II-2021)
 101. Kibs y transferencia de conocimiento desde una perspectiva de internacionalización (I-2022)
 102. Calidad de las finanzas públicas (II-2022)

