



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Eléctrica

**Estimación de Funciones de Daño Climático sobre
la Economía en Contextos de Incertidumbre**

Autor: Bartolomé Quevedo, Laura

Tutores:

**Frechoso Escudero, Fernando A.
López Muñoz, Paola**

**Grupo de Energía, Economía y
Dinámica de Sistemas**

Valladolid, julio 2022.

Resumen

Los eventos climáticos extremos tales como: las olas de calor, las sequías e incendios, las inundaciones costeras y de interior, aumentan en intensidad y frecuencia conforme se agrava el calentamiento global, causando importantes impactos físicos, sociales y también económicos a través de la degradación de las infraestructuras, el agotamiento de recursos... La magnitud del daño económico aún está por determinar, la comprensión de los mecanismos por los cuales la economía podría responder al daño es indispensable. Los modelos de evaluación integrada pueden ayudar a esta comprensión, junto con la estimación de funciones de daño que transcriben el deterioro del entorno y del clima en impacto económico; combinados, facilitan la caracterización del daño total. Debido al carácter empírico de este ámbito de estudio, el desarrollo de métodos para lidiar con la incertidumbre de los datos es clave para garantizar un verdadero entendimiento de los resultados.

Palabras clave: función de daño, eventos climáticos extremos, daño económico, incertidumbre, modelos de evaluación integrada.

Abstract

Extreme weather events such as heat waves, droughts and fires, coastal and inland floods, increase in intensity and frequency as global warming intensifies, causing significant physical, social and also economic impacts; through infrastructure degradation, resource depletion.... The magnitude of the economic damage is yet to be determined, understanding the mechanisms by which the economy could respond to the damage is indispensable. Integrated assessment models can contribute to this understanding, together with the estimation of damage functions that transcribe the deterioration of the environment and climate into economic impact; combined, they facilitate the characterization of the total damage. Due to the empirical nature of this field of study, the development of methods to deal with data uncertainty is key to ensure a true understanding of the results.

Keywords: damage function, climate extremes, economic damage, uncertainty, integrated assessment models.

Agradecimientos

A Fernando por darme la oportunidad de participar en GEEDS y alimentar nuestro pensamiento crítico en las clases.

A Paola, por la inmensa paciencia con la que me ha guiado y enseñado y por la confianza que me ha prestado para expresarme con libertad en lo educativo y lo emocional, sin olvidar el valioso criterio de Íñigo.

Con especial cariño a mi familia, a mi madre, por ser siempre mi apoyo incondicional y a Juan, por acompañarme en este camino.

Índice de Contenidos

| | |
|---|-----------|
| Capítulo 1: Introducción y Objetivos..... | 1 |
| 1.1. Contenido de la Memoria | 1 |
| 1.2. El Cambio Climático. Introducción al problema..... | 2 |
| 1.2.1. Impactos Físicos Asociados al Cambio Climático..... | 5 |
| 1.2.2. Impactos Económicos Asociados al Cambio Climático | 6 |
| 1.2.3. Puntos de No Retorno y “Tipping-points” | 8 |
| 1.2.4. Políticas de Mitigación y Adaptación | 9 |
| 1.2.5. Herramientas para la Evaluación de Impactos y Políticas de Mitigación | 12 |
| 1.2.6. Estado del Arte de la Representación de Impactos Económicos en IAMs. . | 22 |
| 1.2.7. Incertidumbre en la Evaluación de Impactos del Cambio Climático..... | 30 |
| 1.3. Contexto en el que se Enmarca este Trabajo..... | 32 |
| 1.4. Objetivos..... | 34 |
| 1.5. Fases del Proceso Metodológico | 35 |
| Capítulo 2: Metodología | 37 |
| 2.1. Representación de Impactos en el Modelo | 37 |
| 2.2. Estimación de Funciones de Daño Regionales y Sectoriales. | 41 |
| 2.2.1. Descripción de las Estimaciones de Daño Utilizadas | 41 |
| 2.2.2. Generación de la Base de Datos..... | 46 |
| 2.2.3. Análisis de Incertidumbre de los Datos..... | 50 |

| | | |
|---|--|-----|
| 2.2.4. | Generación del Algoritmo para la Calibración de Funciones | 59 |
| 2.3. | Extrapolación de Resultados para Regiones/Sectores sin Datos | 66 |
| 2.4. | Modelado de Impactos sobre la Economía..... | 69 |
| 2.4.1. | Qué es la Dinámica de Sistemas | 69 |
| 2.4.2. | Características del Modelo Planteado | 72 |
| 2.4.3. | Modelado del Módulo Climático Simplificado..... | 76 |
| 2.4.4. | Integración de las Funciones de Daño en el Modelo | 81 |
| Capítulo 3. Resultados | 85 | |
| 3.1. | Resultados de las Regresiones | 85 |
| 3.1.1. | Bondad del ajuste de las regresiones..... | 85 |
| 3.1.2. | Formas Funcionales de Daño por Evento y Sector | 88 |
| 3.2. | Resultados de las Simulaciones con el Modelo | 96 |
| Capítulo 4. Discusión de los resultados..... | 99 | |
| 4.1. | Análisis de la representatividad de los datos | 99 |
| 4.2. | Sobre las Formas Funcionales del Daño Directo..... | 100 |
| 4.3. | Sobre las Formas Funcionales del Daño Directo por Sector | 101 |
| 4.4. | Sobre el Daño Directo en el Sector/Región más Vulnerable..... | 102 |
| 4.5. | Sobre los Resultados Obtenidos de la Simulación del Modelo | 105 |
| Capítulo 5. Conclusiones | 109 | |
| 5.1. | Conclusiones Sobre el Uso de Variables Explicativas | 109 |

| | | |
|---|--|------------|
| 5.2. | Conclusiones Sobre las Formas Funcionales de Daño Directo | 110 |
| 5.3. | Conclusiones Sobre los Resultados de la Simulación | 111 |
| 5.4. | Limitaciones de la Metodología y Líneas Futuras de Trabajo | 112 |
| 5.5. | Valoración Personal del Trabajo Realizado | 114 |
| Anexo A. Sub-sectores del proyecto LOCOMOTION. | | 117 |
| Anexo B. Matrices de Extrapolación Sectorial y por Evento..... | | 119 |
| Anexo C. Matriz de Correspondencia..... | | 121 |
| Referencias..... | | 123 |

Índice de Abreviaturas

| | |
|---------------|--|
| GMST | <i>Global Mean Surface Temperature</i> (temperatura media superficial global) |
| RMST | <i>Regional Mean Surface Temperature</i> (temperatura media superficial regional) |
| SLR | <i>Sea Level Rise</i> (elevación del nivel del mar) |
| GEI | Gases de Efecto Invernadero |
| PIB | Producto Interior Bruto |
| CMNUCC | Convención Marco de las Naciones Unidas |
| IAM | <i>Integrated Assessment Model</i> (modelo de evaluación integrada) |
| IPCC | <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> |
| SRES | <i>Special Report on Emissions Scenarios</i> |
| RCP | <i>Representative Concentration Pathways</i> |
| BAU | <i>Business As Usual</i> |
| GCM | <i>Global Climate Model</i> (modelo climático global) |
| RCM | <i>Regional Climate Model</i> (modelo climático regional) |
| IPC | Índice de Precios al Consumidor |
| RD | <i>Relative Damage</i> (daño relativo) |
| TCRE | <i>Transient Climate Response to Cumulative Emissions of CO₂</i> |
| EAD | <i>Expected Annual Damage</i> (daño anual esperado) |
| DICE | <i>Dynamic Integrated Climate-Economy</i> |
| FUND | <i>Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution</i> |
| PAGE | <i>Policy Analysis of the Greenhouse Effect</i> |
| SCC | <i>Social Cost of Carbon</i> |
| LROW | <i>LOCOMOTION Rest of the World</i> |

Índice de Figuras

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 1 | <i>Evolución de GMST y concentraciones de CO2 en los periodos geológicos.</i> | 3 |
| Figura 2 | <i>Evolución de los eventos climáticos en las distintas regiones del mundo.</i> | 4 |
| Figura 3 | <i>Tipping-points que podrían alcanzarse este siglo.</i> | 9 |
| Figura 4 | <i>Módulos que suelen contener los modelos de evaluación integrada.</i> | 17 |
| Figura 5 | <i>Ejemplo de posibles relaciones clima-economía con realimentaciones.</i> | 17 |
| Figura 6 | <i>Evolución de las emisiones de CO2 en los diferentes escenarios SSPs.</i> | 21 |
| Figura 7 | <i>Uso de escenarios dentro de IAMs.</i> | 21 |
| Figura 8 | <i>Algunas de las funciones de daño más populares de la literatura.</i> | 27 |
| Figura 9 | <i>Fases del proceso metodológico</i> | 36 |
| Figura 10 | <i>Efectos de la adaptación en el daño directo.</i> | 38 |
| Figura 11 | <i>Exposición del sector industria en una región específica,</i> | 39 |
| Figura 12 | <i>Exposición dentro del prototipo de módulo económico.</i> | 39 |
| Figura 13 | <i>Esquema del modelo planteado en este TFG</i> | 41 |
| Figura 14 | <i>Asociación entre las infraestructuras de Forzieri y los sectores del modelo.</i> | 43 |
| Figura 15 | <i>Esquema de la base de datos</i> | 44 |
| Figura 16 | <i>Incremento de temperatura regional asociado al daño relativo</i> | 49 |
| Figura 17 | <i>Evolución del RD y su desviación típica en España. Sector del refino.</i> | 50 |
| Figura 18 | <i>Evolución del RD y su desviación típica en Bélgica. Sector del petróleo.</i> | 51 |
| Figura 19 | <i>Script para la aplicación de la prueba de Shapiro Wilk</i> | 52 |
| Figura 20 | <i>Histograma de una población del periodo dos.</i> | 53 |
| Figura 21 | <i>Histograma de una población del periodo tres.</i> | 54 |
| Figura 22 | <i>Histograma de una población del periodo cuatro.</i> | 54 |
| Figura 23 | <i>Coefficiente de asimetría de Fisher para inundaciones de interior.</i> | 55 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 24 | <i>Coefficiente de asimetría de Fisher para olas de frío.</i> | 56 |
| Figura 25 | <i>Coefficiente de asimetría de Fisher para sequías.</i> | 56 |
| Figura 26 | <i>Histograma representativo de la asimetría positiva,</i> | 57 |
| Figura 27 | <i>Datos atípicos introducidos por modelos climáticos para inundaciones</i> | 58 |
| Figura 28 | <i>Funciones calibradas en base a las distintas estimaciones GCM-RCM.</i> | 59 |
| Figura 29 | <i>Código para la elección del evento para la calibración.</i> | 60 |
| Figura 30 | <i>Código para la asignación de datos a las variables</i> | 61 |
| Figura 31 | <i>Código para la reordenación de datos</i> | 61 |
| Figura 32 | <i>Código para la detección y sustitución de punto atípicos</i> | 62 |
| Figura 33 | <i>Código para realizar regresiones en MATLAB</i> | 63 |
| Figura 34 | <i>Código para identificar la mejor forma funcional</i> | 65 |
| Figura 35 | <i>Regiones Köppen.</i> | 68 |
| Figura 36 | <i>Bucle positivo en dinámica de sistemas.</i> | 70 |
| Figura 37 | <i>Bucle con realimentación negativa en dinámica de sistemas</i> | 70 |
| Figura 38 | <i>Cadena de daños indirectos</i> | 76 |
| Figura 39 | <i>Realimentaciones entre módulos clima—economía.</i> | 77 |
| Figura 40 | <i>Parámetro TCRE (pendiente de la recta).</i> | 79 |
| Figura 41 | <i>Módulo climático en Vensim.</i> | 80 |
| Figura 42 | <i>Estructura de las funciones de daño en Vensim</i> | 83 |
| Figura 43 | <i>Estadístico R^2 para sequías</i> | 85 |
| Figura 44 | <i>Estadístico R^2 para inundaciones de interior</i> | 86 |
| Figura 45 | <i>Estadístico R^2 para las olas de calor</i> | 86 |
| Figura 46 | <i>Estadístico R^2 para las olas de frío</i> | 87 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 47 | <i>Estadístico R^2 incendios</i> | 87 |
| Figura 48 | <i>Formas funcionales que mejor ajustan para el evento sequías.</i> | 89 |
| Figura 49 | <i>Formas funcionales que mejor ajustan para el evento olas de calor.....</i> | 89 |
| Figura 50 | <i>Formas funcionales sectoriales asociadas a sequías, máximos.....</i> | 90 |
| Figura 51 | <i>Formas funcionales sectoriales asociadas a sequías, promedios</i> | 91 |
| Figura 52 | <i>Suma del daño al sector minero español.....</i> | 92 |
| Figura 53 | <i>Daño directo de las sequías al sector metalúrgico de Eslovenia.....</i> | 92 |
| Figura 54 | <i>Daño directo de las sequías al sector químico de Grecia.....</i> | 93 |
| Figura 55 | <i>Daño directo de las sequías al sector de tratamiento de aguas de Eslovenia .</i> | 94 |
| Figura 56 | <i>Daño directo de las sequías al sector energético español.</i> | 95 |
| Figura 57 | <i>Daño directo de las sequías al sector energético español, varios eventos.</i> | 95 |
| Figura 58 | <i>Pérdida de PIB global bajo un escenario SSP5-RCP8.5</i> | 96 |
| Figura 59 | <i>Pérdida de PIB bajo un escenario SSP5-RCP8.5 en 2075.</i> | 97 |
| Figura 60 | <i>Pérdida de PIB: temperatura endógena vs. temperatura exógena</i> | 97 |

Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1 <i>Ejemplo de población para España, primer periodo.</i> | 45 |
| Tabla 2 <i>Relación $\Delta GMST$ -- periodo</i> | 47 |
| Tabla 3 <i>Ejemplo de población una vez construida la base de datos</i> | 48 |
| Tabla 4 <i>Estadístico R^2 medio por evento y escenario de incertidumbre.</i> | 88 |
| Tabla 5 <i>Resultado de las regresiones para España, sector minero.</i> | 91 |
| Tabla 6 <i>Resultado de las regresiones para Eslovenia, sector metalúrgico.</i> | 92 |
| Tabla 7 <i>Resultado de las regresiones para Grecia, sector químico.</i> | 93 |
| Tabla 8 <i>Resultado de las regresiones para Eslovenia, sector de tratamiento de aguas.</i> . | 93 |
| Tabla 9 <i>Resultado de las regresiones para el sector energético de España.</i> | 94 |

Capítulo 1: Introducción y Objetivos

1.1. Contenido de la Memoria

Introducción y objetivos. En este apartado se exponen las problemáticas actuales del cambio climático y de la representación de sus impactos en modelos de evaluación integrada. Además, se caracteriza el estado del arte en la representación de impactos mediante funciones de daño y se especifica el contexto en el que se enmarca el presente trabajo. Asimismo, se fijan unos objetivos y se establecen las fases que se van a seguir en el proceso metodológico.

Metodología. En esta sección se desarrolla el proceso seguido para la creación de una base de datos (a partir de las estimaciones de un estudio anterior) para la obtención de los parámetros de las funciones de daño, se justifica la necesidad de plantear escenarios de incertidumbre y se profundiza en el procedimiento de cálculo subyacente a los parámetros. Además, se explica la estructura del prototipo de modelo económico empleado para testear las funciones de daño y el modelado de un módulo climático sencillo y otro de impactos del cambio climático en Vensim.

Resultados. En esta sección se muestran los resultados obtenidos de las regresiones y de su simulación en Vensim.

Discusión de resultados. Se comentan los resultados y se contrastan con la literatura.

Conclusiones. Se extraen conclusiones de los resultados y se valora el cumplimiento de los objetivos.

1.2. El Cambio Climático. Introducción al problema.

El clima de la Tierra está cambiando rápidamente y un fuerte propulsor de este cambio es de origen antropogénico; la industrialización ha marcado un antes y un después en la evolución de indicadores climáticos tales como la temperatura superficial media global (GMST), el aumento del nivel del mar (SLR), la acidificación de los mares, etc., provocando su incremento hasta niveles que amenazan la seguridad y la salud de las especies (IPCC, 2021). Una de las manifestaciones del cambio climático se encuentra en el calentamiento global¹ que se caracteriza por un incremento de la temperatura superficial con distintas tendencias posibles dependiendo de la evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero. Del estudio del paleoclima² se obtienen evidencias de esta relación “concentración de gases de efecto invernadero (GEI) – GMST” (Figura 1). En la imagen se observa una evolución gradual de la temperatura media superficial entre periodos hasta llegar al último (Eoceno), donde toma partido la actividad humana, que se “dispara” de forma atípica tanto en niveles de dióxido de carbono como en temperatura media. Este mismo comportamiento se ha expuesto en otros estudios como en (Steffen et al., 2018) donde se alerta además, de las posibles retroalimentaciones negativas del sistema terrestre que nos “ayudan” a no cambiar de era climática y a mantener un cierto equilibrio (como la absorción de CO₂ por los océanos), pero también la existencia de retroalimentaciones biofísicas positivas que nos impulsarían a la transición y harían al sistema inestable (cambios en el ciclo del carbono a causa del deshielo del permafrost que podría comenzar a liberar CO₂ acelerando el calentamiento global o pérdida del hielo y la nieve del hemisferio norte, lo que mermaría el coeficiente de albedo y la facultad del sistema terrestre para liberar la energía que entra).

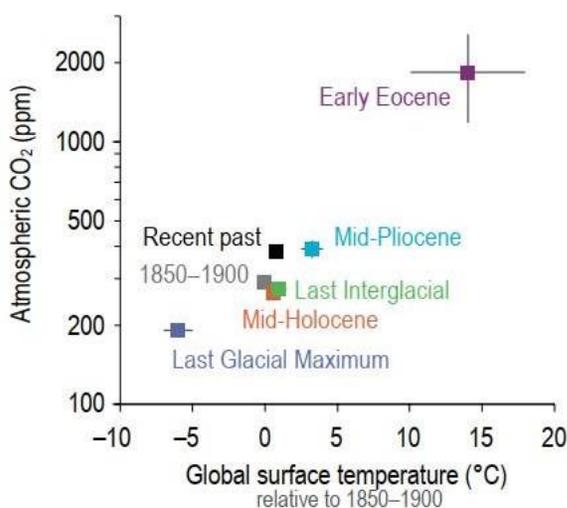
¹ Alteración de las propiedades radiativas de la atmósfera a causa de la emisión y acumulación de gases de efecto invernadero, consecuencia de la quema de combustibles fósiles que produce una acumulación de energía en forma de calor en el planeta.

² Estudio y caracterización del clima a lo largo de los periodos.

Más recientemente, el incremento de la GMST desde la etapa preindustrial (1850-1900) hasta la actualidad (2011-2020) ha sido de 1.09°C y, aún en el escenario³ de emisiones más optimista, se prevé un aumento de entre 1.0°C y 1.8°C para 2100, el incremento de temperatura podría llegar hasta los 5.7°C bajo los escenarios más pesimistas (IPCC, 2021).

Figura 1

Evolución de GMST y concentraciones de CO₂ en los periodos geológicos.



Fuente: (IPCC, 2021)

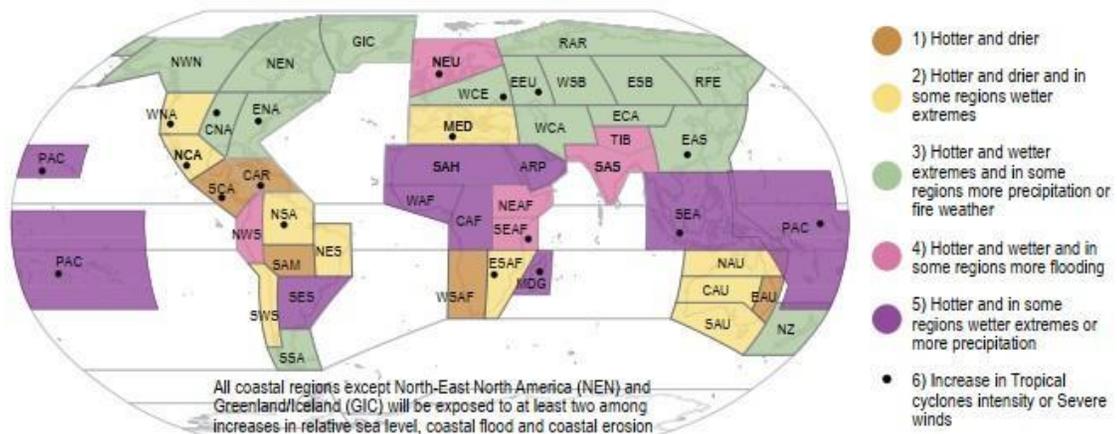
Además de las variaciones en los valores medios de los indicadores climáticos, también se ha detectado un aumento en la variabilidad del clima que se consume en el incremento de la magnitud y la frecuencia de eventos climáticos extremos relacionados con el calor (sequías, olas de calor, incendios...), los ciclones (tormentas de viento) y las borrascas (precipitaciones agudas de naturaleza esporádica que pueden llegar a causar inundaciones de interior), o también en el aumento del nivel del mar (relacionado con las inundaciones costeras). En algunos casos, como en

³ En el apartado 1.2.4 se explica el concepto de escenario. Los escenarios de emisiones optimistas son aquellos que plantean que la sociedad va a evolucionar por vías sostenibles y va a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, los escenarios pesimistas plantean vías de desarrollo en las que se sigue emitiendo GEI como usualmente se ha hecho.

los eventos de calor, se ha relacionado la frecuencia y la intensidad con la que se producen directamente con el calentamiento global y la elevación de la temperatura. En la Figura 2 se muestra un mapa que recoge la tendencia de los eventos extremos en distintas zonas geográficas. En general, los eventos relacionados con el calor aumentarán en frecuencia en contraposición con las olas de frío, que se verán altamente mermadas en muchas regiones. Los eventos relacionados con las precipitaciones se darán de forma pronunciada en algunas regiones específicas, y aunque se espera que las precipitaciones medias disminuyan, se prevé que su covarianza aumente, produciendo en consecuencia un incremento en las inundaciones.

Figura 2

Evolución de los eventos climáticos en las distintas regiones del mundo.



Fuente: (IPCC, 2021)

Otros estudios como (Fischer et al., 2021) reafirman esta idea y han detectado, en base a simulaciones, que los eventos extremos no solo van a volverse más intensos, sino que van a ocurrir a niveles nunca antes registrados en datos históricos y que podrían acontecer en las próximas décadas. Argumentan que la probabilidad de ocurrencia de estos eventos está ligada al camino de emisiones más que al nivel de calentamiento global. En los escenarios donde se sigue

contaminando a un ritmo elevado, las olas de calor con duración superior a una semana son siete veces más probables en 2021-2050 y 21 veces más en 2051-2080.

No obstante, debido a la naturaleza episódica de estos eventos y a los escasos registros que se tienen de ellos y de sus impactos asociados, pronosticar los cambios que van a experimentar a largo plazo resulta complicado (IPCC, 2021).

1.2.1. Impactos Físicos Asociados al Cambio Climático

Las consecuencias del cambio climático son muchas y muy diversas. Además de las catástrofes que los eventos anteriormente citados podrían potenciar, se pueden considerar otra clase de impactos físicos:

- **Impacto en los océanos:** el aumento del pH de los océanos (como consecuencia de una mayor absorción de CO₂ presente en la atmósfera), la desoxigenación potenciada por la eutrofización⁴ de las aguas, el aumento de la temperatura de las masas de agua y las olas de calor en estas, son algunas de las consecuencias del cambio climático sobre los ecosistemas marinos cuyo impacto va a perturbar gravemente la biodiversidad de este medio (IPCC, 2021).
- **Impacto en la biodiversidad:** a pesar de los esfuerzos de adaptación y conservación de las especies realizados, se estima que debido al cambio climático se perderán un 34% y 46% de las especies endémicas de ecosistemas terrestres y marinos (Manes et al., 2021). Alrededor de un millón de especies se encuentran en peligro de extinción y un gran número de ellas desaparecerán en los próximos decenios. La dinámica de este daño es exponencial (Watson et al., 2019).

⁴ Proliferación excesiva de algunas formas de vida (como algas) que agotan los recursos de los ecosistemas acuáticos. Es causada por la contaminación de las aguas con nutrientes inorgánicos (fósforo o nitrógeno) provenientes de la actividad humana (fertilizantes, etc.)

- **Impacto en la Criosfera⁵:** la pérdida de hielo glaciar como consecuencia del aumento de la temperatura de las masas de agua es un daño irreparable cuya inercia persistirá incluso en los escenarios más optimistas de emisiones. La elevación del nivel del mar y la consecuente amenaza para las regiones costeras es solo uno de los potenciales peligros (IPCC, 2021).
- **Impactos sobre la salud:** causados por la contaminación del aire y los recursos hídricos, pero también por un cambio en la transmisión de determinadas enfermedades infecciosas y la aparición de nuevas enfermedades usualmente relacionadas con climas tropicales (Tirado Blázquez, 2010). Además, la acusada vulnerabilidad del sector agrícola al cambio climático va a causar una disminución de su capacidad productiva de un 30% en África en este siglo debido, principalmente, a la falta de recursos hídricos y a que las cosechas se hallan en su máximo índice de tolerancia a la temperatura (Bhattacharya, 2019). La degradación de los recursos alimenticios, hídricos y medioambientales supondrá una mayor amenaza sobre la población de los países subdesarrollados. Del mismo modo, las olas de calor, que aumentan en intensidad y frecuencia, son responsables de la muerte de un gran número de personas en poco tiempo. En España, se atribuyen 713 muertes a la última ola de calor vivida en junio de 2022 (La Razón, 2022).

1.2.2. Impactos Económicos Asociados al Cambio Climático

Los efectos que el cambio climático puede tener sobre la economía son muchos y muy variados. Por ejemplo, se espera que el cambio climático vaya a disminuir el crecimiento económico y la productividad (Dunne et al., 2013), pero la magnitud de estos efectos aún no está completamente definida. Las estimaciones parecen tender hacia la infravaloración de estos daños (Gillingham et al., 2015),(Schewe et al., 2019), además "los impactos económicos globales

⁵ Superficie terrestre ocupada por masas de agua en estado sólido.

causados por el cambio climático son difíciles de estimar”, asegura el IPCC, que advierte de que las estimaciones realizadas del coste social del carbono⁶ varían desde unos pocos dólares a cientos de ellos (Dokken, 2014). Esta disparidad es causada por el uso de distintos métodos de evaluación del impacto por parte de los modelos utilizados.

El cambio climático va a afectar a los suministros de energía, mermando su rendimiento, pero también influirá en la demanda energética de forma desigual en cada región. Además, de manera muy probable afectará a la industria y su efecto se acentuará en los países menos desarrollados, potenciando la desigualdad y la pobreza. A pesar de que en el corto plazo y para ciertos sectores específicos el cambio climático pueda ocasionar un impacto “positivo” en la economía, muchos estudios evidencian que el daño global y a largo plazo es negativo y que los resultados dependen en gran medida de hasta dónde lleguen los propios límites del estudio, a nivel espacial y temporal (Kousky, 2014).

El daño anual medio desde el año 2000 causado por eventos climáticos extremos oscila en un rango de entre 94 y 130 billones de dólares, y se sabe que estas cifras están incompletas debido a la falta de información en las bases de datos y a la incapacidad para evaluar e incluir los daños indirectos que estos fenómenos ocasionan (Kousky, 2014).

Uno de los principales impactos que pueden tener los fenómenos climáticos extremos sobre la economía tiene que ver con la destrucción y depreciación de bienes de capital tales como infraestructura, maquinarias o edificios. Este tipo de bienes son esenciales para el desarrollo productivo de un país, por lo que un daño sobre los mismos puede tener fuertes efectos de arrastre sobre la economía. Esto hace que el estudio de los daños del cambio climático sobre el capital sea de esencial importancia (Fankhauser & S.J. Tol, 2005).

⁶ El coste social del carbono es definido como el daño económico (medido en unidades monetarias) que causa la emisión de una tonelada de CO₂ a la atmósfera.

En Forzieri et al. (2018) se especifica, en base a un gran número de estudios, cómo los eventos climáticos extremos pueden degradar las infraestructuras críticas⁷ de distintos países. Por ejemplo, las olas de calor disminuyen la capacidad de transmisión de las líneas eléctricas y reducen la eficiencia de las plantas fotovoltaicas, las sequías afectan a los sistemas de refrigeración de distintos procesos debido a que reducen el volumen de agua del que pueden disponer o la calidad de la misma. Los eventos de calor, en general, producen dilataciones y esfuerzos térmicos en las estructuras, así como la expansión de gases combustibles en los conductos y tuberías. Como se ha mencionado, estos son impactos directos pero una vez se produzcan estos daños potenciales pueden sobrevenir otros daños económicos fruto de las relaciones interregionales e intersectoriales, que podrían multiplicar el daño.

1.2.3. Puntos de No Retorno y “Tipping-points”

La amenaza del cambio climático no se restringe a lo ya mencionado en los anteriores apartados, sino que va más allá, pudiendo provocar daños irreversibles si se superan ciertos límites, que de hecho la sociedad está cerca de alcanzar (IPCC, 2021).

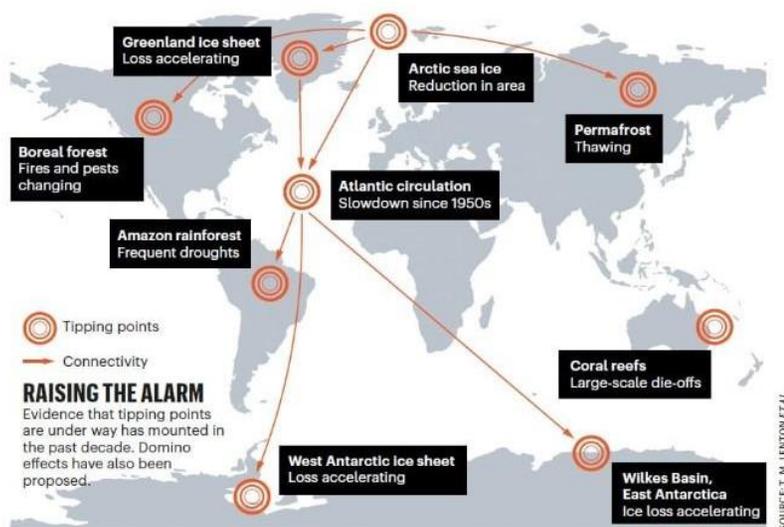
Un *tipping-point* (o punto de inflexión climática) es una barrera natural que, si es propasada o violada, impele una cadena de daños catastróficos cambiando las reglas con las que el clima funciona (Job One for Humanity, s. f.). Antes de producirse un *tipping-point* se llega a un punto de no retorno situado en una posición de equilibrio inestable que conduce a un nuevo estado climático, con irreversibles e inciertas (pero probablemente catastróficas) consecuencias. Algunos de los *tipping-points* y su cadena de influencias se recogen en la Figura 3. Se estima que con un incremento de 1°C a 2°C globales respecto a niveles preindustriales algunos de estos límites serán

⁷Se denomina infraestructura crítica de la UE a una infraestructura cuya perturbación afectaría gravemente al menos a dos países de la Unión Europea. Es un elemento esencial para las funciones sociales, económicas y vitales en general (EUR-Lex, s. f.).

cruzados. Actualmente ya se ha propasado 1°C y con el Acuerdo de París se busca no llegar a superar de ninguna manera los 2°C y, a poder ser, tampoco los 1.5 °C (Nature, 2019).

Figura 3

Tipping-points que podrían alcanzarse este siglo.



Fuente: (ESA, s. f.)

1.2.4. Políticas de Mitigación y Adaptación

Las acciones por frenar el cambio climático se han promovido por muchas vías tanto a nivel global, como continental y nacional.

La CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas) de 1992, es una convención en la que se propone por primera vez limitar la emisión de gases de efecto invernadero, reconociendo este elemento como una amenaza para la salud de las personas y para el clima. En él se “establece un objetivo elevado pero específico”, en palabras textuales: estabilizar las emisiones "a un nivel que impida interferencias antropógenas (inducidas por el hombre) peligrosas en el sistema climático" y "ese nivel debería alcanzarse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible" (UNFCCC, s. f.-

c). No se especifica ni un límite preciso de emisiones de GEI, ni un tiempo límite estricto para alcanzarlo, pero, como se ha mencionado en el apartado 1.2.2, sí hay una clara presión y urgencia para frenar estas emisiones.

Poco después de ser aprobada la Convención⁸, en 1997, el IPCC advierte cambios sustanciales en el clima debido a las emisiones de GEI y, por esta razón, se decide esclarecer límites de emisión y plazos precisos, al menos para las economías más desarrolladas. Entra en vigor en 2005 el Protocolo de Kioto y Europa se compromete a reducir sus emisiones un 8% en el primer periodo de compromiso, repartiendo la carga entre sus países miembros, estableciendo a España un límite de emisiones que no supere el 15% del periodo base (MITECO, s. f.-b),(El País, 2014). Europa cumple el objetivo, no así España, pero se escucha la siguiente declaración desde Europa: “España incrementó sus emisiones por encima del límite que marca Kioto, pero se espera que consiga su objetivo comprando créditos de reducción de emisiones ⁹a otros países mediante los mecanismos de flexibilidad que contempla el protocolo” (El País, 2014). Entre 2008 y 2012 el Gobierno ha gastado más de 800 millones de euros en comprar derechos de emisión: “España, entre los países que más pagan por cumplir Kioto” (El País, 2013).

El Protocolo de Kioto establece objetivos “estrictos” de reducción de emisiones para las economías más desarrolladas, pero también ofrece los denominados “mecanismos de flexibilidad” para alcanzar dichos objetivos. Estos mecanismos fueron exigidos por el vicepresidente de Estados Unidos, Al Gore, como una vía de escape legal. Son tres los mecanismos que se proporcionan en este acuerdo, uno de ellos es el comercio de emisiones. Este sistema genera un incentivo económico a los países para que su desarrollo se produzca con bajas emisiones. Se establece un

⁸ Se entiende por “Convención” la convención de 1992 de la CMNUCC.

⁹ Los créditos de reducción de emisiones son uno de los mecanismos de flexibilidad que se establecen dentro del protocolo de Kioto.

“derecho a emitir” con el que se puede comercializar, no hay límites individuales de emisión, pero sí globales (MITECO, s. f.-a). Esta herramienta de comercio de emisiones no se ha quedado en un simple mecanismo dentro del Protocolo de Kioto, sino que se ha “reciclado” este concepto para la creación de nuevos mercados de emisiones como el régimen comunitario de comercio de derechos de emisión de la Unión Europea (RCCDE), instaurado después de la salida de Estados Unidos del Protocolo de Kioto.

Hoy en día, la promesa más fuerte contra el cambio climático se encuentra en el Acuerdo de París de 2015. Es un acuerdo global que establece medidas y directrices y en el que se fijan unos límites de incremento de temperatura global respecto a niveles preindustriales (el más ambicioso de 1.5°C y un tope de 2°C). Este acuerdo “exige a todas las partes que hagan todo lo que esté en su mano por medio de contribuciones determinadas a nivel nacional¹⁰” (UNFCCC, s. f.-b). Lo cierto es que el Acuerdo de París no es, por completo, un acuerdo vinculante desde un punto de vista jurídico ni sus normas son todas ellas de obligado cumplimiento (Nava Escudero, 2016). Un aspecto formal, de obligado cumplimiento en este tratado internacional, es el que se manifiesta en el artículo 12 sobre sensibilización y educación acerca del cambio climático y la transparencia por parte de los países comprometidos con este acuerdo.

Frenar el avance del cambio climático se ha planteado, a lo largo de la historia, desde un punto de vista económico; ya sea por el intento de generar una rentabilidad de la inversión en políticas de mitigación y adaptación (creando mercados) o por las sanciones económicas que se imponen en los acuerdos. Todo ello refuerza la idea de “quien contamina paga” (EUR-Lex, 2020),

¹⁰ Las “contribuciones determinadas” o NDCs (*Nationally Determined Contributions*) son aquellas acciones climáticas que cada nación ha decidido llevar a cabo para cumplir con el acuerdo. El Acuerdo de París exige a las naciones que comuniquen todas aquellas medidas instauradas a partir de 2020 (UNFCCC, s. f.-a).

pero no procura un verdadero aprendizaje de todas las capas sociales e industriales como para que se produzca un cambio sustancial en la forma en que entendemos el crecimiento y la prosperidad.

1.2.5. Herramientas para la Evaluación de Impactos y Políticas de Mitigación

El cambio climático es un problema complejo cuyas soluciones son, del mismo modo, complejas debido a que involucran un gran número de variables que se interrelacionan dificultando la toma de decisiones (De Blas et al., 2021). Por este motivo se han generado herramientas que permiten analizar las consecuencias de aplicar una u otra política. Así surgen, normalmente orientados a la evaluación de políticas de mitigación del cambio climático, los modelos de evaluación integrada (IAMs o *Integrated Assessment Models*). Los IAMs describen de forma cuantitativa los sistemas humano-tierra y sus relaciones, utilizando para ello información de muchas disciplinas científicas, y se han aplicado con éxito en la generación de políticas climáticas (UNFCCC, s. f.). Por ejemplo, los investigadores pueden especificar un objetivo de emisiones y luego usar un IAM para determinar qué políticas y tecnologías podrían ser las más rentables para alcanzar dicho objetivo. Es decir, los modelos de evaluación integrada son útiles traduciendo objetivos generales en medidas específicas que además sean óptimas y por eso se han empleado para intentar resolver incógnitas relacionadas, por ejemplo, con qué se necesitaría para limitar el calentamiento global por debajo de los 2°C para 2100, relativo al Acuerdo de París (PNAS, 2021). Aunque los modelos son una representación simplificada de la realidad, también son una herramienta técnica, con usos prácticos y con capacidad para representar un conjunto manejable de aspectos claves de la realidad para dar respuesta a preguntas específicas y soporte a las decisiones políticas desde la ciencia.

No obstante, precisamente porque estas herramientas son ampliamente utilizadas para evaluar políticas, es imprescindible analizarlas desde una perspectiva crítica, ya que los IAMs

presentan algunas debilidades en distintos aspectos y uno de ellos es la representación de impactos del cambio climático en la economía (Doukas & Nikas, 2020). Tal y como se expondrá con más detalle posteriormente, se puede decir que, hasta la fecha, los daños económicos asociados al cambio climático han sido estimados por estos modelos de forma muy agregada y sus predicciones no concuerdan con la dramática situación que presentan muchos científicos naturales (Rising et al., 2022). Existe, por tanto, una clara desconexión entre el daño calculado a partir de funciones calibradas en base a métodos econométricos y lo que las ciencias climáticas pronostican. Los modelos no representan todas las amenazas climáticas (eventos extremos, *tipping-points*...) o lo hacen con un bajo nivel de detalle, usando pocas variables que no alcanzan a explicar todo el daño o realizan extrapolaciones fuera del ámbito de calibración introduciendo una gran incertidumbre en sus resultados (Woillez et al., 2020).

Infravalorar los daños y no advertir sobre la incertidumbre de los resultados puede traer consecuencias graves ya que aquellos que realizan las políticas se basan en esta clase de modelos (Rising et al., 2022). La incertidumbre es, por tanto, un elemento clave a tener en cuenta en este ámbito de estudio. Este concepto se aborda con más detalle en el apartado 1.2.7.

En relación con lo anterior cobra sentido un concepto o aforismo atribuido al estadístico George Box que dice así: “*All models are wrong, but some are useful*” (Todos los modelos están equivocados, pero algunos son útiles). Esta frase, formulada en sus orígenes para modelos estadísticos, se ha extendido a todos los ámbitos científicos, y quiere señalar que es muy difícil reducir la realidad a modelos, pero que aun así hay que seguir trabajando en ello, puesto que pueden ayudarnos a comprender esa realidad y buscar soluciones.

1.2.5.1. Modelos de Evaluación Integrada y el Uso de Escenarios

Los modelos de evaluación integrada son herramientas de evaluación numérica en los que se interrelacionan multitud de variables de distintas áreas (económicas, sociales, climáticas...) y cuyo resultado proporciona la tendencia evolutiva del sistema (De Blas et al., 2021). En Carbon Brief (^a2018) se diferencian dos clases de IAMs según su grado de complejidad. Por un lado, están los modelos más “simples” que se centran en evaluar los costes de alcanzar un determinado grado de calentamiento global, para lo cual usan ecuaciones muy simplificadas y no se modelan con demasiado detalle las relaciones entre la economía, el clima, el consumo energético, etc. Una distinción parecida es la que se realiza en Weyant (2017) donde esta clase de modelos se han denominado IAMs de *benefit-cost analysis* (análisis coste-beneficio) y se caracterizan por representar de manera muy agregada los impactos (por lo que no pueden analizar políticas a nivel regional o sectorial) y reducir el daño a una única variable de salida, usualmente económica. Algunos ejemplos de ello son los modelos DICE, FUND y PAGE. Estos IAMs, aunque sencillos, son los más utilizados en el cálculo del denominado coste social del carbono (SCC). El modelo DICE es, en sí mismo, un problema de optimización capaz de calcular las trayectorias óptimas de emisiones y consumo para disminuir el coste social del carbono. Los otros dos modelos, en cambio, introducen estas trayectorias como entradas y determinan qué política es mejor a partir del contraste de los resultados de todas ellas (Kellett et al., 2019). Es importante resaltar que la optimización se realiza para analizar la viabilidad económica del proyecto, que en este caso es la emisión de GEI, en tanto que no suponga un “daño irreversible” (Alatorre et al., 2019). Asimismo, estos modelos son utilizados para evaluar qué política de mitigación es más rentable u óptima con el fin de priorizarla por delante de otras que no son tan económicamente rentables, esto se hace a través de la curva de abatimiento (Weyant, 2017), que analiza la rentabilidad de reemplazar una

tecnología con altas emisiones por una con bajas emisiones. En esta curva se representan una gran variedad de medidas¹¹ que podrían llevarse a cabo en distintos sectores con el fin de reducir las emisiones de CO₂. Es más, estos modelos más sencillos también se usan para calcular los denominados *tax carbon* o impuesto a la emisión de CO₂ y lo cierto es que cada modelo, en función de cómo modelan los impactos del cambio climático, ofrece resultados muy distintos (Weyant, 2017).

Por otra parte, los modelos más complejos usan módulos en los que dividen las diferentes áreas de interés (economía, energía, uso de la tierra, módulos demográficos, etc.) y las conectan para analizar sus interacciones bajo escenarios “*what-if*”¹². Por ejemplo, un escenario *what-if* consistiría en evaluar, con un IAM, la hipótesis de imponer uno u otro precio a las emisiones. Algunos de estos módulos son programados a partir de leyes físicas y otros usan métodos econométricos, lo cual significa que, al menos en este aspecto, no existe una única forma de modelado (Carbon Brief, 2018), pero en todo caso disponen de herramientas para evaluar las interdependencias de los sectores y las regiones del mundo y, además, pueden evaluar los impactos físicos del cambio climático y no solo los económicos (Weyant, 2017) . En la Figura 4 se expone de manera esquemática el flujo de información y la estructura general de esta clase de IAMs. A la izquierda se muestran lo que típicamente son las entradas al modelo y a la derecha las salidas.

¹¹ Cada medida se ve representada por dos indicadores; el beneficio o coste económico de reemplazar dicha tecnología (no todas las medidas medioambientales suponen ahorros económicos) y la potencia de cada actividad por reducir las emisiones (Pacheco, 2010). De esta forma los políticos pueden saber cuánto se reducen las emisiones y cuánto cuesta o si es rentable hacerlo.

¹² Los escenarios “What-if” son hipótesis o conjuntos de hipótesis acerca de cómo podría evolucionar la sociedad que se plantean y que intentan responder a preguntas del tipo “¿Qué pasaría si...?”. Estas hipótesis se programan dentro de los IAMs para analizar sus efectos

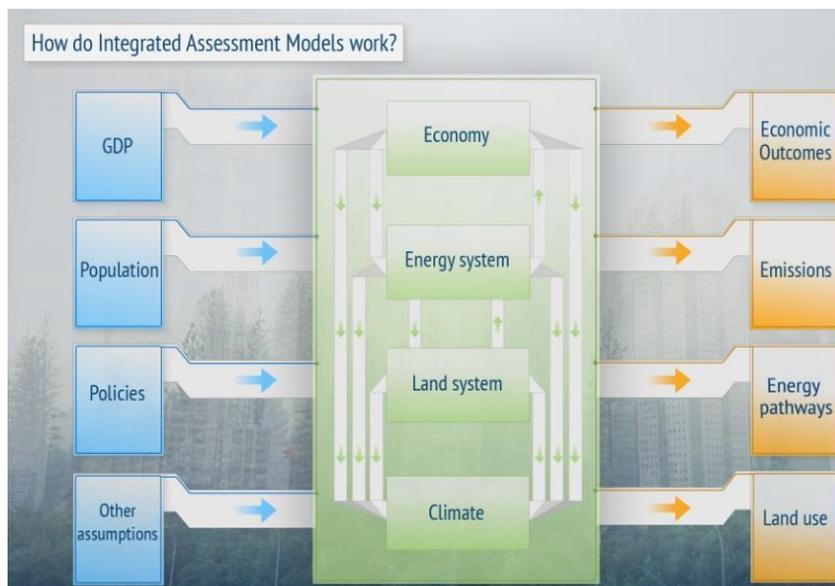
No obstante, en la literatura se encuentran otras clasificaciones de IAMs algo distintas en base a cómo se modela la economía y cómo se integran el resto de los módulos. A continuación, se expone muy brevemente la tipología de IAMs que se consideran en (Doukas et al., 2019):

- **IAMs de crecimiento óptimo u optimización del bienestar:** la economía se modela como un sector único que lo engloba todo y buscan calcular el valor óptimo de inversión que maximice el consumo y minimice las emisiones.
- **IAMs de equilibrio óptimo:** modelan la economía y los módulos energéticos con más detalle, con resolución regional. No buscan la política óptima, sino que evalúan el impacto de las políticas en las variables económicas.
- **IAMs de equilibrio parcial:** proporcionan un análisis detallado de las interacciones entre economía y clima y se suelen utilizar para evaluar los posibles daños económicos inducidos por el clima. Una subcategoría importante es la de los modelos de sistemas energéticos, que evalúan la forma menos costosa de reducir las emisiones en base a los costes de la tecnología. También se incluye en esta clasificación los modelos macroeconómicos en los que no se asume un comportamiento óptimo de la economía, sino que en base a históricos se formalizan relaciones más realistas.

En cuanto a la relación clima – economía, es habitual que en base a la producción y el consumo en el módulo económico se calculen unas emisiones de GEI que se acumulan en un stock en el módulo climático. En este se calcula el incremento de temperatura (u otro indicador) asociado a las emisiones y se intenta captar el daño económico y social de haber contaminado. También pueden llegar emisiones por parte del módulo energético, fruto de las actividades que se modelan en su interior.

Figura 4

Módulos que suelen contener los modelos de evaluación integrada.

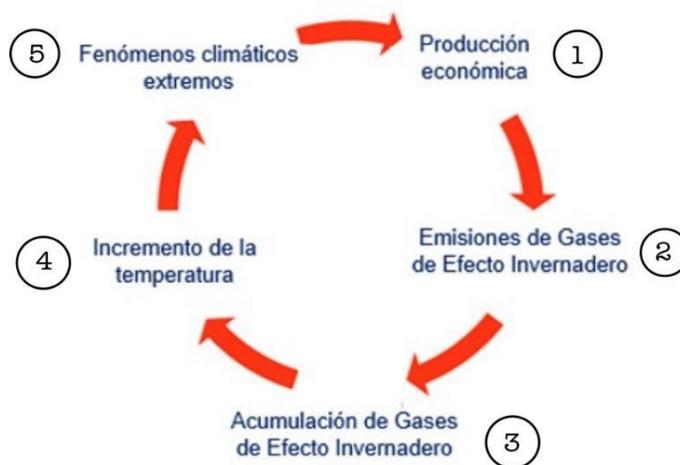


Fuente: (Carbon Brief, 2018)

Sin embargo, aunque la mayoría de los IAMs sí que incluyen un módulo climático, pocos “cierran el círculo” (Figura 5) a través de la realimentación clima-economía.

Figura 5

Ejemplo de posibles relaciones clima-economía con realimentaciones.



Fuente: Elaboración propia.

Por último, es importante remarcar que, aunque los IAMs son buenos captando las relaciones económicas y tecnológicas, su principal reto es la representación de la parte social. A menudo, las decisiones que se toman dentro de estos modelos solo se justifican desde el punto de vista económico (De Blas et al., 2021) y teniendo en cuenta que aún se tiene un escaso entendimiento de los múltiples mecanismos por los que el cambio climático podría afectar a todos los ámbitos sociales, es lógico que estos mismos mecanismos no hayan sido representados con detalle en los modelos.

Para procurar un correcto análisis de los resultados y garantizar la transparencia y fundamentación de los modelos, se suelen utilizar en los IAMs una serie de “escenarios” orientados a unificar hipótesis sobre cómo va a ser el futuro bajo diferentes condiciones socioeconómicas, tecnológicas y ambientales (De Blas et al., 2021). Según Escoto Castillo et al. (2017) se pueden distinguir tres clases de escenarios:

- **Escenarios de emisiones de GEI:** describen las trayectorias futuras de emisión de gases de efecto invernadero.
- **Escenarios de clima:** describen cómo cambiarán las condiciones climáticas en el futuro en base a las emisiones de GEI aportando información acerca de la evolución de la temperatura y otros indicadores climáticos.
- **Escenarios de adaptación:** describen los efectos esperados sobre ciertos grupos o variables.

El IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), por su parte, propuso a principios de siglo XXI distintos escenarios de emisiones llamados SRES (*Special Report on Emissions Scenarios*), nombre dado por el artículo publicado en el 2000 en el que se definieron sus bases. En este artículo (IPCC, 2000), se especifican cuatro familias de escenarios de emisiones que

caracterizan posibles vías de evolución de la sociedad, sin que ninguna sea más probable que las otras. Estos escenarios, empleados en el AR4 (*Fourth Assessment Report*), no contemplaban políticas orientadas a la mitigación de emisiones, por lo que en el AR5 de 2007 se establece una nueva familia de trayectorias llamadas RCP (*Representative Concentration Pathways*). La narrativa que explica estos escenarios se caracteriza por ser más técnica y cuantitativa, considerando la evolución de parámetros como el forzamiento radiativo¹³, entre otros. Estos escenarios se renovarían en el sexto informe (AR6) de 2021 a través de la generación de nuevos escenarios: los SSPs (*Shared Socio-Economic Pathways* o trayectorias socioeconómicas compartidas). Esta última familia de escenarios propuesta por el IPCC captura la dimensión de los cambios sociales que son las fuerzas motoras del cambio climático (Escoto Castillo et al., 2017). Al igual que los SRES, las trayectorias socioeconómicas compartidas contemplan escenarios de desigualdad, equidad, sostenibilidad y desarrollo basado en combustibles fósiles. Los escenarios SSPs que se contemplan en el AR6 se indican a continuación, también son visibles en la Figura 6.

- SSP1-RCP1.9: muy bajas emisiones de GEI (sostenibilidad)
- SSP1-RCP2.6: bajas emisiones de GEI
- SSP2-RCP4.5: nivel intermedio de emisiones de GEI (camino a la sostenibilidad, pero lentamente)
- SSP3-RCP7.0: altas emisiones de GEI (rivalidad regional, baja prioridad a cuestiones medioambientales)

¹³“Variación, expresada en $W m^{-2}$, de la irradiación neta (la descendente menos la ascendente) en la tropopausa o en la parte superior de la atmósfera, debida a una variación de un impulsor externo del cambio climático; por ejemplo, una variación de la concentración de dióxido de carbono o de la radiación solar.”(*Glosario IPCC (2018)*, s. f.)

- SSP5-RCP8.5: muy altas emisiones de GEI (desarrollo impulsado por combustibles fósiles)

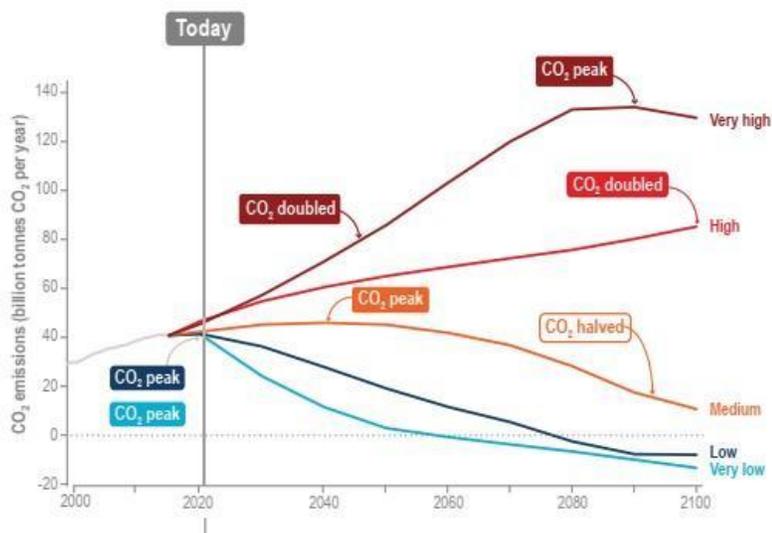
Sin embargo, aunque los escenarios anteriormente mencionados fijan los estándares en los que se basan el resto de las trayectorias, los SSPs no son los únicos utilizados y cada modelo puede generar sus propios escenarios fijando unos u otros parámetros exógenos y obteniendo, tras la simulación, resultados endógenos al modelo. Usualmente, detrás de cada trayectoria se puede identificar una filosofía o narrativa distinta que la caracteriza: crecimiento económico con escasas o nulas políticas de mitigación de emisiones (*Business as usual*¹⁴ o *BAU*), crecimiento económico por vías sostenibles (*green growth*) y/o aunque los SSP no contemplan este escenario, escenarios de decrecimiento económico (*post growth*) (Óscar Carpintero & Jaime Nieto, 2022). Aplicados unos escenarios u otros, se evalúa la tendencia futura de las variables del sistema. De esta forma es posible comparar distintas políticas y determinar cuál es más conveniente. Por ejemplo: en el sexto informe del IPCC (AR6) todos los modelos IAMs utilizados concluyen que, bajo un escenario *business as usual* (correspondiente a la evolución *High* o *Very High* de los escenarios SSPs de la Figura 6), el incremento de temperatura será de 2.8 – 4.6 °C (respecto a niveles preindustriales) para 2100 (IPCC, 2021).

Hasta el momento se han mencionado dos tipos de escenarios: los escenarios *what-if* y los escenarios tipo SSPs (y anteriores). Se puede considerar que los escenarios SSPs son un tipo de escenarios *what-if*, pero los primeros están formalizados y estandarizados con el fin de que, quien los use, pueda comparar los resultados de sus simulaciones con otros modelos.

¹⁴ El escenario *Business as usual* hace referencia a evolucionar como se viene haciendo hasta el momento, es decir, con un alto nivel de emisiones de GEI.

Figura 6

Evolución de las emisiones de CO₂ en los diferentes escenarios SSPs.

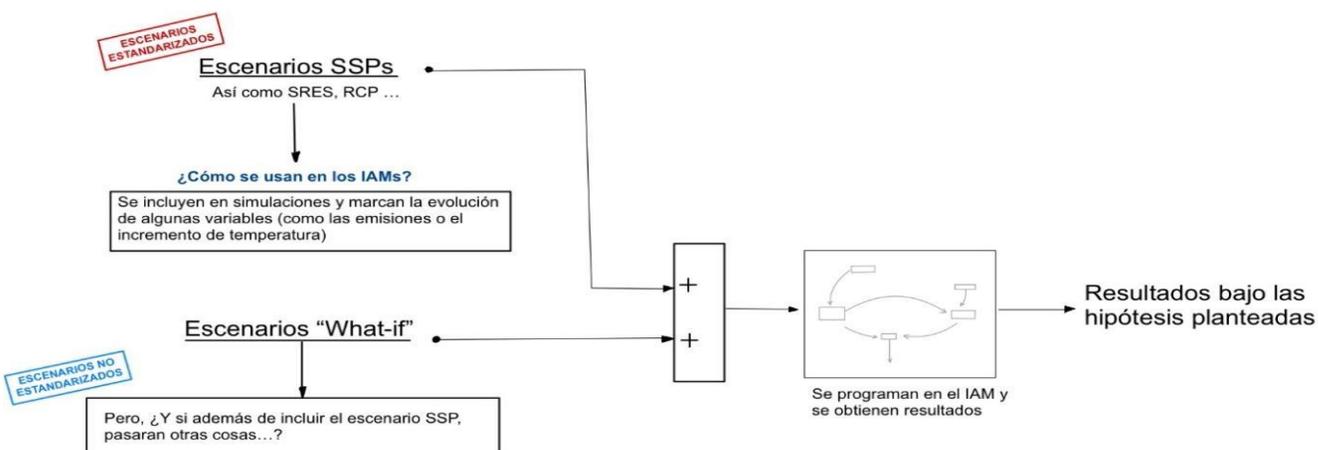


Fuente: (IPCC, 2021)

No hay impedimento para que se puedan programar ambos escenarios ya que no son excluyentes, en la Figura 7 se esquematiza esta idea. Por otra parte, es importante recalcar que, a fecha actual, ninguna de las familias de escenarios generadas por el IPCC incluye impactos del cambio climático.

Figura 7

Uso de escenarios dentro de IAMs.



Fuente: Elaboración propia.

1.2.6. Estado del Arte de la Representación de Impactos Económicos en IAMs.

A fecha actual no existe demasiado consenso sobre cómo los impactos del cambio climático pueden afectar a la economía; en el estudio de Tsigaris & Wood (2019) se aplican los impactos directos a distintas variables económicas como a la productividad, la depreciación del capital o la producción, pero otros estudios lo aplican directamente al Producto Interior Bruto (PIB). La incógnita reside en cómo materializar en las ecuaciones económicas el impacto del cambio climático, ¿qué variables se verán afectadas y en qué medida? No existe una respuesta concreta para esta pregunta. Lo cierto es que la comunidad científica se encuentra ante un complejo problema multidisciplinar (De Blas et al., 2021) y aunque conocemos una gran variedad de impactos que el cambio climático está ocasionando y podría ocasionar, aquellos relacionados con la economía aún son difíciles de capturar.

Tal y como se ha mencionado de manera breve anteriormente (ver 1.2.4), la mayoría de los modelos de evaluación integrada que han intentado representar los impactos del cambio climático en la economía han recibido múltiples críticas en estudios como (Wollez et al., 2020) y otros que se irán mencionando en los próximos párrafos. Es importante tener en mente que este ámbito de investigación aún se encuentra en fase de desarrollo y que evoluciona constructivamente con las críticas recibidas (De Blas et al., 2021).

Los IAMs suelen modelar el impacto del cambio climático en la economía a través del uso de funciones de daño, nombre con el que se designa a la ecuación que relaciona el módulo climático con el económico dentro de un IAM. Las funciones de daño son útiles a la hora de evaluar los daños directos del cambio climático en la economía en tanto que permiten relacionar las pérdidas económicas con uno o varios indicadores climáticos tales como la temperatura atmosférica, el nivel del mar o eventos climáticos extremos (Zhao et al., 2020). La estructura, de

una función de daño se puede describir de forma general como una variable dependiente económica en función de una o más variables independientes o indicadores climáticos (López Muñoz et al., 2021).

$$\text{Daño} = f(\text{indicador climático}) \quad (1)$$

La elección de las variables (dependiente e independiente) es una cuestión relevante que se ve restringida en gran medida por la manera en que estén programados los módulos. Existen inexcusables evidencias de que el aumento de la temperatura media o las precipitaciones son algunas, pero no las únicas variables que explican el cambio climático y marcan la evolución, frecuencia e intensidad de sus efectos. Por ejemplo, en Roson & Sartori (2016) se analiza la relación entre el aumento de temperatura y el aumento del nivel del mar, otra posible variable explicativa, y se encuentra una relación entre ambas. El uso de una u otra variable explicativa o el número de variables utilizado influye determinantemente en la representación de los daños que causa el cambio climático.

De forma general, los modelos suelen expresar la variable dependiente como pérdida de PIB global medido en unidades monetarias respecto al año base de simulación. Como variables independientes o explicativas se suelen emplear el incremento de temperatura y el SLR (*Sea Level Rise* o aumento del nivel del mar), aunque existen otras. Se puede considerar que el incremento de temperatura y el SLR son entradas a la función de daño, provenientes del módulo climático. En este módulo se calcula el incremento de temperatura media global, el SLR u otros posibles indicadores climáticos, en base al escenario de emisiones propuesto. Lógicamente, bajo una trayectoria de *business as usual*, en la que no hay políticas de mitigación, la concentración de GEI aumentará y supondrá mayores incrementos de temperatura calculados por el módulo climático y en principio, más daño.

1.2.6.1. Funciones de Daño Relevantes en la Literatura.

En la literatura actual la forma funcional más ampliamente extendida es la cuadrática (en lo sucesivo se comentan algunas de las más influyentes). Si bien existe un claro consenso entre las ciencias naturales y la economía en que los daños deben ser no lineales¹⁵, hasta el momento no hay ninguna justificación científica para la forma parabólica. En Keen et al. (2021) se advierte del origen de esta suposición, tan largamente utilizada; esta forma fue propuesta por el economista Nordhaus que introdujo, por primera vez en un IAM (DICE), una función que aplicaría un daño económico al PIB en función del incremento de temperatura alcanzado a causa de la acumulación de GEI. La hipótesis que asume Nordhaus proviene a su vez de la interpretación de un estudio anterior (Lenton et al., 2008) en el que se decía que “la sociedad puede dejarse llevar por una falsa sensación de seguridad por las suaves proyecciones de cambio global” y del que dedujo, erróneamente según Keen et al. (2021), que no se produciría ningún *tipping-point* en 300 años. Al descartar el suceso de esta clase de singularidades climáticas en un horizonte tan lejano, que a su vez son un foco de no linealidades y efectos en cascada (como ya se ha comentado), y con la idea en mente de que las proyecciones de cambio serían “suaves”, según su propia apreciación del artículo original, Nordhaus propuso, precisamente, una forma funcional de evolución suave como es la cuadrática.

A pesar de que la literatura actual sobre *tipping-points* advierte del posible acontecimiento de estos eventos en el corto plazo, las funciones que se usan en los IAMs en el presente no dejan

¹⁵ Esto es así porque los impactos del cambio climático no evolucionan de forma proporcional, sino que los efectos son cada vez más y más severos. En este estudio (Dellink et al., 2019) se justifica como las economías de las naciones se ven dañadas de forma no lineal por el cambio climático. Se explica que esta no linealidad surge por la limitada capacidad de las economías para ajustarse a los cambios en los factores productivos, cuando estos se ven afectados por el cambio climático y se aportan, además, otras razones como, por ejemplo, que algunos impactos del cambio climático afectan directamente al ratio de crecimiento económico y no solo al PIB y esto podría generar no linealidades.

de parecerse a la original. Es más, el modelo DICE es utilizado en la valoración del coste social del carbono, cuando es sabido que con una forma funcional que incluyese *tipping-points* este coste sería mayor (Keen et al., 2021).

Para la obtención de una función de daño, en la literatura actual, se procede de la siguiente forma: se propone una forma funcional no lineal (habitualmente cuadrática) y se calibran los parámetros en base a una hipótesis que suele ser de la siguiente forma: “para X °C de incremento de temperatura global se obtiene X% de pérdida de PIB global”. El punto usado para calibrar se obtiene, en la mayoría de las ocasiones, en base a criterios de expertos.

Algunas de las funciones de daño más populares de las presentes en la literatura, analizadas en Siegel et al., (2021), son las que se muestran en la Figura 8.

- **Nordhaus:**

$$\text{Daño}(t) = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{T(t)}{18.8}\right)^2} \quad (2)$$

Calibrada para una pérdida de 2.1% del PIB global para 3°C de incremento de temperatura global. Esta función ha sido empleada en versiones antiguas del modelo DICE.

- **Weitzman**

$$\text{Daño}(t) = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{T(t)}{20.46}\right)^2 + \left(\frac{T(t)}{6.08}\right)^{6.754}} \quad (3)$$

Esta función concuerda con la de Nordhaus para bajas temperaturas, pero aplica un daño más alto a mayores niveles de calentamiento global.

- **Hanneman**

$$\text{Daño}(t) = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{T(t)}{12.2}\right)^2 + \left(\frac{T(t)}{6.24}\right)^{7.02}} \quad (4)$$

La formulación de esta ecuación sigue las directrices marcadas por las anteriores, pero eleva el daño en todos los niveles de temperatura.

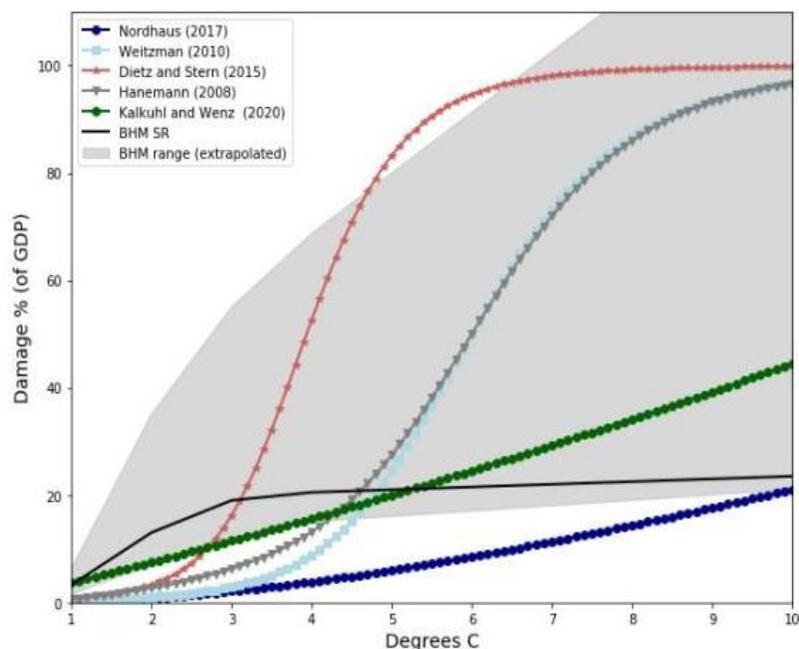
En cuanto a las funciones de daño utilizadas por los modelos de análisis coste-beneficio mencionados en el anterior apartado; muchos de ellos modelan en sus funciones tanto el daño que causa el cambio climático a la variable económica como la capacidad de adaptación¹⁶ del sistema a dicho daño (i.e. la adaptación en muchas funciones se encuentra de forma implícita). La función empleada por el modelo PAGE es bastante sensible al calentamiento global a partir de los 3°C, momento en que su pendiente aumenta reflejando que la capacidad de adaptación al cambio climático disminuye cuando el riesgo de que se produzca una discontinuidad climática aumenta. Por otra parte, el modelo DICE utiliza formas cuadráticas suaves como las expuestas anteriormente. El modelo FUND proyecta beneficios netos por debajo de los 2.5°C (esto se debe en gran parte a las hipótesis que se asumen sobre el papel de la adaptación que pronostican un aumento en la productividad de la agricultura y una reducción en la demanda de calor), (Diaz & Moore, 2017).

Al contrario que las funciones de daño estimadas en el ámbito de este TFG, las funciones de la figura 8 se han calibrado para capturar todo el daño, directo e indirecto, que el cambio climático podría producir en la economía. Se quiere puntualizar este hecho porque en este trabajo fin de grado solo se ha capturado el daño total económico que causa la degradación de infraestructuras, es decir, solo se contempla esta tipología de daño.

¹⁶En el apartado 1 se profundiza sobre este concepto.

Figura 8

Algunas de las funciones de daño más populares de la literatura.



Fuente: (Siegel et al., 2021)

1.2.6.2. Problemáticas Asociadas a las Funciones de Daño en la Literatura.

Algunos inconvenientes que suelen tener las funciones de daño presentes en la literatura y que intentan ser remediados con la implantación de una nueva metodología de cálculo desarrollada en el marco de este TFG, y que se explicará en el capítulo 2, son:

- a. No se suelen modelar diferentes tipos de eventos climáticos extremos (Gillingham et al., 2015).
- b. En la literatura se calibran funciones de daño agregadas porque los modelos IAMs para los que usualmente se calibran consideran un número de países y sectores reducido. Estos son modelos como DICE (12 regiones, (*Scientific and Economic Background on DICE models*, 2020)), FUND (16 regiones, (*FUND Model*, s. f.)) o PAGE (8 regiones, (Yumashev, s. f.))

- c. No se justifica la forma funcional. Por ejemplo, en Dietz & Stern (2015) se dice que la forma funcional cuadrática se ha elegido “en gran parte por conveniencia” y anotan que otros autores como Nordhaus han asumido preceptos parecidos (aunque el mismo Nordhaus define estas bases como “marcadores de posición sujetos a más investigación”) y que, al no saber la verdadera forma funcional, “tiene sentido probar diferentes formulaciones que representen diferentes posibilidades, incluidas las extremadamente dañinas que la ciencia da como posibles”.
- d. La mayoría de las funciones de daño se aplican directamente al PIB (variable de salida) simplificando la cadena causal del daño¹⁷.
- e. En relación con el punto “d”, es habitual encontrar estudios que como en Franzke (2021) estiman funciones de daño sin recoger los efectos de los daños indirectos¹⁸. En esta clase de estudios calibran las funciones en base a métodos estadísticos, pero no se disponen de herramientas para evaluar la interrelación de las variables económicas a través de las cuales se puede diseminar el daño.
- f. En la literatura es común encontrar funciones calculadas con datos históricos para lo cual es una crítica habitual acusar la desactualización de las fuentes en las que se encuentran dichos datos.
- g. Actualmente se está avanzando en materia de evaluación de la incertidumbre en los datos, en la metodología y en los resultados, pero muchos expertos en ciencias climáticas aún advierten una seria tendencia a la infravaloración de los daños (Schewe et al., 2019).

¹⁷Este concepto se aborda con más detalle en el apartado “2.4.2.1 Cadena de Daños Indirectos” y hace referencia a las relaciones entre las variables económicas a las que podría afectar el cambio climático, además del PIB, que es un indicador resumen del crecimiento económico, pero no el único indicador del progreso económico ni del bienestar.

¹⁸Más adelante se definen todas las tipologías de daño, directo, indirecto y total.

1.2.6.3. Definición de Daño Directo, Indirecto y Total.

El IPCC afirma que los impactos del cambio climático que se proyectan están sujetos a incertidumbre, pueden ocurrir según lo previsto o no, por lo que deben definirse como un daño potencial (López Muñoz et al., 2021). El potencial impacto del cambio climático cambia según las vías socioeconómicas y de desarrollo que se consideren. En concreto, el potencial impacto del cambio climático suele representarse como la suma del daño directo y el daño indirecto ocasionado (López Muñoz et al., 2021). El daño directo puede definirse como el “primer impacto”, aquel que deriva del evento mismo que lo genera, y vendría representado por las funciones de daño. El daño indirecto, en cambio, es el que surge de manera endógena a partir de las relaciones del sistema y dependerá fuertemente de las características del modelo. Por ejemplo: el acontecimiento de una sequía puede dañar al sector de la agricultura en una cierta región (daño directo) y a su vez influir en la economía de otra región que importaba su producto (daño indirecto). Esto se puede ver a través de un modelo si estas interrelaciones interregionales están adecuadamente representadas.

En el estudio de Zhang et al. (2021), realizado en base a la economía de China y que caracteriza algunas de las amenazas citadas anteriormente dentro del modelo EMRICES-2021, se ha estimado que las pérdidas económicas acumuladas asociadas al daño indirecto exceden por mucho los daños directos, lo que denota la gran importancia de contabilizarlos en la evaluación de impactos. No obstante, como se ha mencionado previamente en el punto “e.” relacionado con los puntos débiles de las funciones de daño de la literatura, muchos modelos no tienen en cuenta estos daños indirectos; al introducir directamente las funciones de daño en el PIB y siendo esta variable, generalmente, un *output* del modelo que no afecta a otras variables económicas, el impacto directo es igual al impacto total. Entre los IAMs que tienen en cuenta los impactos indirectos, el daño

directo se “inyecta” en el sistema, afectando a alguna variable que a su vez se relaciona con otras, y se evalúa el daño acumulado resultante, es decir, el daño total.

$$\text{Daño total} = \text{Daño directo} + \text{Daño indirecto} \quad (5)$$

Sin embargo, el daño directo no solamente depende de la amenaza que lo produce sino también de otros elementos, tales como la exposición, la vulnerabilidad y la capacidad de adaptación del sistema ante tal evento. Este planteamiento es el que se utiliza en el ámbito del proyecto LOCOMOTION, proyecto en el que se enmarca este trabajo, para definir el daño directo. El planteamiento contempla y pone en el centro que la estimación de estos potenciales impactos está sujeta a incertidumbre, por lo que hay que considerar este elemento como algo central. Las implicaciones de la incertidumbre se definen y caracterizan en el siguiente apartado.

1.2.7. Incertidumbre en la Evaluación de Impactos del Cambio Climático

La incertidumbre es un concepto muy amplio y no solo se aplica a la evaluación del cambio climático, sino que muchas otras áreas científicas lidian con esta realidad en su campo de estudio. Se puede definir este concepto como “una falta general de conocimiento o acuerdo sobre los posible resultados y sus probabilidades” y es posible mitigar sus efectos a través de la experiencia de especialistas en la materia, capaces de detectar y reducir las brechas de conocimiento en donde se filtra dicha incertidumbre (Doukas & Nikas, 2020).

La incertidumbre en el ámbito que atañe a este trabajo comienza con la inherente complejidad del sistema climático, su variabilidad natural, y se traslada a los modelos climáticos, herramientas informáticas que proyectan el clima futuro en base a las relaciones del sistema humano-tierra.

Las proyecciones climáticas están sujetas a incertidumbre debido a la variabilidad natural del sistema climático y a su naturaleza caótica. Esta variabilidad se asocia tanto a las relaciones

físicas internas que definen el clima, como a la influencia de parámetros externos, véase: las fluctuaciones climáticas que se producen a causa de erupciones volcánicas o cambios en la intensidad de la radiación solar, pero especialmente por la influencia del hombre en el medio (Latif, 2011)

La variabilidad natural del clima intenta ser captada por los modelos climáticos que se utilizan para evaluar la respuesta del sistema terrestre ante la influencia humana. Ocurre que estos modelos simulan distintas respuestas climáticas incluso bajo los mismos escenarios. Esta dispersión en los resultados se asocia a las limitaciones intrínsecas a las herramientas informáticas; resolución reducida, insuficiente capacidad de cómputo para evaluar relaciones muy complejas... También existen procesos, como la formación de las nubes, cuya comprensión aún es limitada, lo que provoca que sean modelados de distintas formas en los modelos climáticos, induciendo incertidumbre (Latif, 2011).

Además de lo anterior, también existe incertidumbre acerca de los daños que el cambio climático puede ocasionar y de qué forma. En cuanto a los daños económicos; algunos autores afirman que el cambio climático afecta instantáneamente a la economía y otros asumen que los efectos del daño sobre el crecimiento económico deben persistir a lo largo del tiempo. La forma en que se manifiesta el daño, con eventos extremos o *tipping-points*, también está sujeta a incertidumbre ya que son sucesos estocásticos, sujetos a probabilidades (Cai, 2020)

Finalmente, los modelos de evaluación integrada también lidian con la incertidumbre ya generada en las fases de caracterización del clima e incurren en otros tipos de incertidumbre debido a las hipótesis que deben asumir para representar sistemas tan complejos. La incertidumbre que introducen los modelos de evaluación integrada en materia de cambio climático suele estar relacionada, según Cai, (2020), por el uso de parámetros dentro del modelo estimados a partir de

históricos o encuestas. Un ejemplo de estos parámetros está en los propios coeficientes de las funciones de daño. Sin embargo, aunque se pudiera conocer con seguridad el valor de estos parámetros, la amenaza que describen es cambiante y está sujeta a probabilidades. Un método empleado para abordar esta problemática es el análisis de sensibilidad, a través del cual se varían los parámetros sujetos a incertidumbre y se analiza la robustez del modelo en función del impacto que tenga la variación del parámetro. Del mismo modo, los IAMs también pueden introducir incertidumbre por la necesidad de asumir hipótesis que simplifiquen el modelo o por la incapacidad de plantear todos los escenarios posibles, aunque se hayan abarcado una gran diversidad de ellos.

Como se ha comentado existen formas matemáticas de evaluar la incertidumbre de los modelos IAMs, pero a veces la mejor manera es la expresión clara y concisa de los puntos donde se produce la filtración de dicha incertidumbre y esto se consigue con la transparencia en la metodología, como se especifica en Skea et al. (2021). En este estudio se indica que la transparencia debe abarcar todas las fases; desde el modelado de la estructura del IAM, la comunicación de las asunciones e hipótesis de las que se parte e incluso la publicación del código de programación en formato de libre acceso para que las futuras líneas de investigación puedan apoyarse en lo ya desarrollado.

1.3. Contexto en el que se Enmarca este Trabajo

La metodología utilizada en este trabajo cumple con los requisitos propuestos por el Grupo de Investigación de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas (GEEDS) de la Universidad de Valladolid (Uva) y específicamente con el proyecto LOCOMOTION en materia de representación de daños del cambio climático en la economía. Se trata de un proyecto financiado por la Unión Europea dentro del programa Horizonte 2020 en el que participan un gran número de socios coordinados por la Uva. El objetivo de este proyecto es la confección de un modelo IAM capaz de

captar las interacciones entre un gran número de módulos, estos son: economía, finanzas, población y sociedad, tierra, agua, clima, energía, materiales y transporte. Las funciones de daño que en este trabajo se estiman, formarán parte de este modelo en un futuro. No obstante, con el objetivo de comprobar el funcionamiento de las funciones de daño estimadas en este trabajo, se ha programado un prototipo de módulo económico con el software Vensim¹⁹ que recoge algunas de las características que tendrá el modelo definitivo, que se está desarrollando en GEEDS. Este prototipo de modelo económico no ha sido desarrollado en el ámbito de este trabajo fin de grado. Sin embargo, sí se ha modelado en este trabajo un módulo climático capaz de comunicarse con el económico para generar el indicador climático que alimenta a las funciones de daño y también se han programado escenarios exógenos que responden a las trayectorias SSPs. Asimismo, se ha modelado un módulo de impactos que contiene la estructura de las funciones de daño. Por tanto, en adelante se denomina “modelo” en el marco de este TFG, a la interacción de tres módulos; el módulo climático, el módulo con el prototipo de modelo económico, y el módulo de impactos.

A modo de síntesis, el trabajo realizado en este TFG ha consistido en la generación de una base de datos en EXCEL, partiendo de las estimaciones de un estudio anterior seleccionado fuera del ámbito de este trabajo por su nivel de desagregación sectorial y regional. A partir de estos datos se ha generado un algoritmo con MATLAB, que permite analizar la incertidumbre de los modelos climáticos usados en el estudio original para estimar el daño. Además, este algoritmo permite la detección de puntos atípicos y ofrece al usuario su eliminación y sustitución o no. Del mismo modo, el programa permite efectuar las regresiones para el cálculo de las funciones de daño y posibilita al usuario elegir el tipo de evento climático del que quiere realizar funciones de forma

¹⁹ Software diseñado para programar usando la teoría de dinámica de sistemas (Ver “Qué es la Dinámica de Sistemas”) en la que mediante diagramas causales se relacionan variables a través de ecuaciones para finalmente realizar simulaciones.

automática. Se ha programado el algoritmo para que seleccione la forma funcional que mejor se ajusta de entre las propuestas, utilizando para evaluar el ajuste el estadístico R^2 . Por otra parte, se han trabajado los datos de salida del algoritmo para posibilitar su introducción en el módulo económico y se ha programado en el software Vensim todo lo necesario para poder realizar simulaciones con los datos. Todo esto se explica con más detalle en el “Capítulo 2: Metodología”.

1.4. Objetivos

Los objetivos generales de este trabajo son:

- El cálculo de funciones de daño sobre el stock de capital de manera desagregada a nivel regional y sectorial y además la representación de forma independiente de distintos eventos climáticos extremos. Todo ello debe realizarse analizando y teniendo en consideración la incertidumbre de los datos empleados para la calibración y la propia incertidumbre que se genere en el proceso metodológico por la asunción de distintas hipótesis.
- Desarrollar una metodología de estimación que sirva para ampliar y desarrollar más tipologías de daño en el futuro.
- Integrar las funciones de daño en un prototipo de modelo económico para verificar su funcionamiento.
- Observar y entender cómo responde el módulo económico al daño causado por el cambio climático.

De forma particular se pretenden abordar las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Qué tipo de forma funcional siguen los impactos directos del cambio climático sobre el stock de capital para diferentes sectores, regiones y fenómenos? ¿Existe alguna función predominante?

2. ¿Es el incremento de temperatura un buen indicador para representar todos los impactos que ocasionan los eventos climáticos extremos en la economía?
3. ¿Qué infraestructuras son las más expuestas al daño directo causado por el cambio climático?
4. ¿Reacciona el modelo económico al daño infligido por las funciones de daño? ¿Se difunde el daño por las economías modeladas en el prototipo?
5. ¿Se incrementa el daño total por considerar el daño indirecto?, ¿En qué medida?, ¿A través de qué mecanismos económicos se amplifica el daño?

Las preguntas de investigación formuladas se abordan en el capítulo de conclusiones. Para facilitar su búsqueda al lector se ha subrayado el inicio de la respuesta a cada cuestión.

1.5. Fases del Proceso Metodológico

A continuación, se exponen de forma breve y esquemática las distintas etapas en que se divide el proceso metodológico desarrollado en este trabajo fin de grado, explicando brevemente cada una de ellas, en la Figura 9 se recogen todas estas fases en un esquema.

1. Revisión de literatura

- ↳ Caracterización del estado del arte en la representación de impactos del cambio climático en la economía.

2. Cálculo del daño relativo a las infraestructuras críticas.

- ↳ Creación de una base de datos en EXCEL a partir de los datos de daño directo sobre infraestructuras obtenidos de la literatura. Se estandariza y relaciona esta variable con un indicador climático.

3. Análisis estadístico

- ↳ Estudio de la mejor forma de caracterización de los datos.

4. Calibración de funciones de daño climático

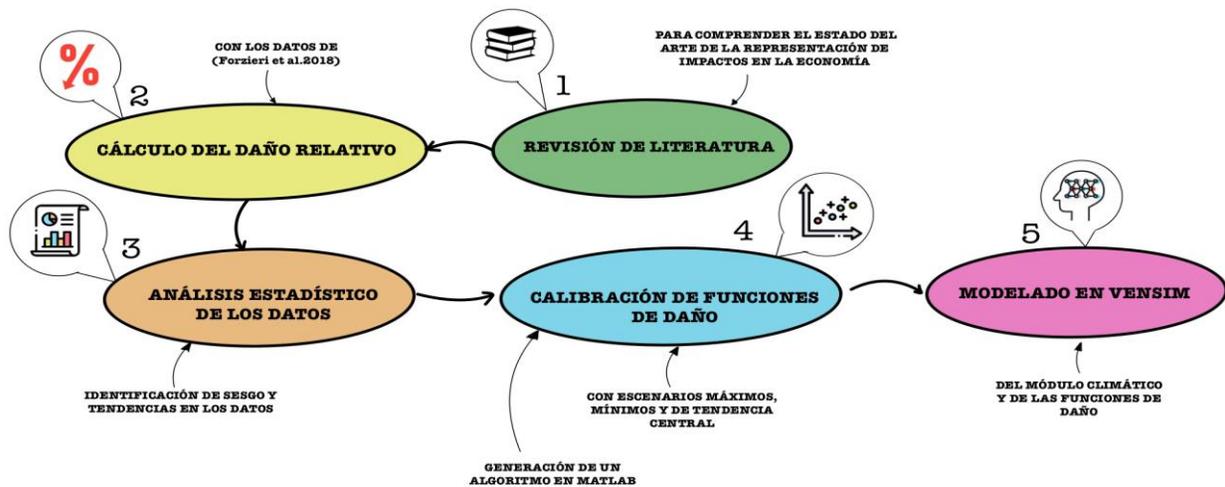
↳ Generación de un algoritmo en MATLAB para la calibración de funciones.

5. Modelado

↳ Modelado en Vensim de un módulo climático sencillo y un módulo de impactos que contenga las funciones de daño.

Figura 9

Fases del proceso metodológico



Fuente: elaboración propia

Capítulo 2: Metodología

2.1. Representación de Impactos en el Modelo

En base en la definición de impacto potencial propuesta por el IPCC y en la metodología desarrollada en el marco del proyecto LOCOMOTION (López Muñoz et al., 2021), se puede definir el daño directo como sigue:

$$\text{Daño directo} = (1 - \text{Adaptación}) \cdot [V(H) \cdot E] \quad (6)$$

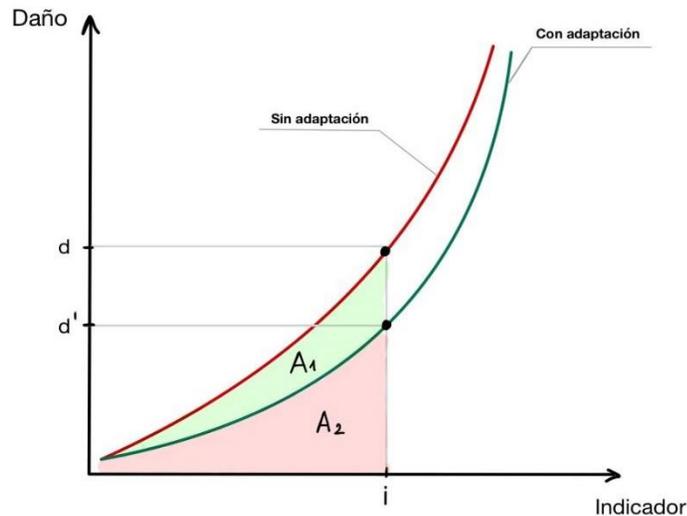
A continuación, se explican los tres elementos de los que se compone el daño y su influencia en los resultados.

La adaptación es la capacidad de la sociedad para minorar los daños directos a través de políticas o desarrollo tecnológico. Este parámetro lleva asociado un coste, el coste de la adaptación, que también debe contabilizarse como pérdidas económicas a causa del cambio climático. Sin embargo, aunque existe un cierto porcentaje de daño que se puede atenuar invirtiendo en políticas de mitigación y adaptación, debido al cambio climático también sobreviene un daño inevitable que ha de tenerse en consideración. Este concepto es denominado *loss and damage* (L&D) y hace referencia a aquellos potenciales impactos del cambio climático que no pueden ser compensados con medidas de mitigación y adaptación (López Muñoz et al., 2021). En la Figura 10 se ilustra este concepto. El área verde es el daño que se prevé poder eludir mediante la adaptación, en cambio, el área roja es el daño potencial inevitable para un nivel “i” de cambio climático (expresado por un indicador).

La exposición, sin embargo, es un factor aumentativo del daño. Por ejemplo, relativo al sector transporte o al sector de la energía, la exposición podría verse como un mapa del territorio donde se sitúan las infraestructuras de transporte y energía definidas según lo que consumen y producen, es decir, caracterizadas a partir de una intensidad de sus procesos.

Figura 10

Efectos de la adaptación en el daño directo.

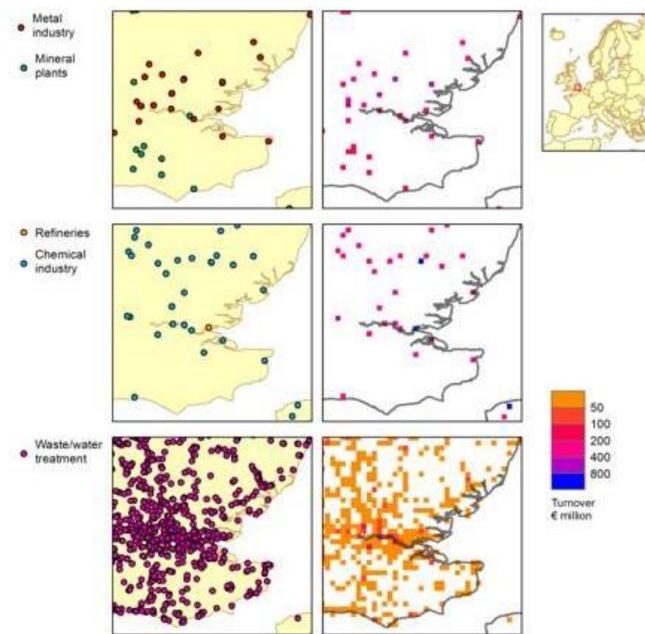


Nota. Fuente: Elaboración propia.

Partiendo de este dato se puede determinar el daño que se produciría a causa de una amenaza potencial en esa zona del territorio. Obviamente, la exposición es característica de cada tipo de sector, de su distribución espacial, de su ubicación, del coste de sus procesos y de su actividad. En la Figura 11 se ilustra este concepto. En el lado izquierdo de la imagen se representa la ubicación espacial de plantas industriales relacionadas con el sector metalúrgico, minero, de la refinería, químico y de tratamiento de aguas. La “intensidad” de la actividad de estas plantas se ha medido en unidades monetarias de facturación. Analizando la imagen se puede apreciar que las plantas químicas se encuentran dispersas, pero cada una de ellas factura mucho en comparación, por ejemplo, con el sector de tratamiento de aguas. No obstante, el sector de tratamiento de aguas, pese a no facturar grandes sumas, concentra un gran número de plantas en el mismo espacio. Ambos casos descritos pueden justificar una elevada exposición de sus infraestructuras.

Figura 11

Exposición del sector industria en una región específica,

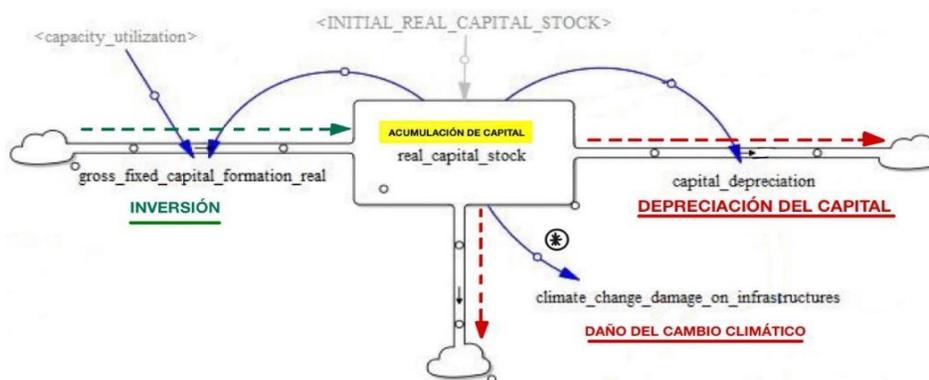


Nota. Fuente: (Forzieri et al., 2018)

La exposición dentro del prototipo de módulo económico es el stock de capital, en la Figura 12 se representa esta variable y como se multiplica por la función de daño (V(H)).

Figura 12

Exposición dentro del prototipo de módulo económico.



Fuente: Elaboración propia

La variable “real capital stock” es el stock de capital (acumulación de capital) que se alimenta a partir de las inversiones (flujo de entrada en verde). El stock de capital se ve disminuido por dos flujos de salida; la depreciación del capital y el daño del cambio climático a las infraestructuras (flujos de salida en rojo). Las funciones de daño son un porcentaje que multiplica al stock de capital (que es la exposición) a través de la flecha azul que se marca con un asterisco y de esta forma se calcula cuántas unidades monetarias deben salir por el flujo rojo producido por el cambio climático.

Por último, el factor $V(H)$, vulnerabilidad en función del evento climático extremo, representa propiamente el daño que produce el evento climático en sí mismo en el sector afectado. Esta variable se expresa en forma porcentual y al multiplicarse por la exposición genera un daño en las unidades en las que se haya expresado esta otra variable (E), ver Figura 12. Cabe destacar que la función depende de la vulnerabilidad del sector ante el evento producido (el grado en que se ve dañada una infraestructura expuesta a un determinado evento). No hay una única forma de determinar la vulnerabilidad de un sector ante una amenaza y a menudo se realiza de forma cualitativa a partir de la opinión de expertos que indican, en base a su experiencia, si la infraestructura se verá muy afectada o poco por el acontecimiento (Forzieri et al., 2018).

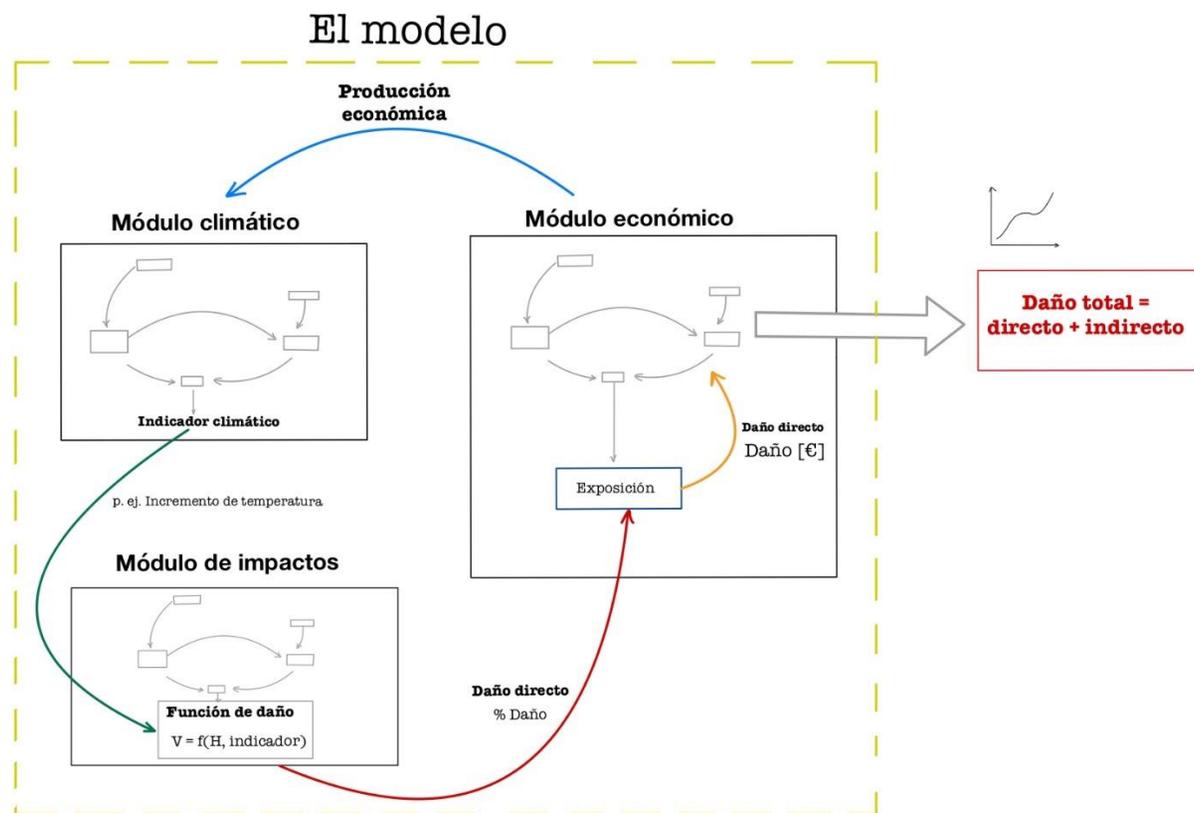
Para evaluar correctamente el daño es necesario representar de forma adecuada los tres elementos mencionados (A , E y $V(H)$), fruto de esta caracterización se obtendrá una relación que permitirá la calibración de la función de daño.

Las relaciones de influencia de unos módulos en otros se programan a través de ecuaciones que parten de una o más variables y actúan sobre otras. En la Figura 13 se presenta de forma esquemática la estructura del modelo planteado en este trabajo fin de grado, donde se observa la

estructura modular y las relaciones entre los módulos. En el módulo de impactos se encuentra modelada la estructura de las funciones de daño.

Figura 13

Esquema del modelo planteado en este TFG



Fuente: Elaboración propia.

2.2. Estimación de Funciones de Daño Regionales y Sectoriales.

2.2.1. Descripción de las Estimaciones de Daño Utilizadas

Para la calibración de las funciones de daño se parte de las estimaciones realizadas en el estudio de Forzieri et al. (2018). En el marco del proyecto LOCOMOTION se ha seleccionado este estudio por ser el que mejor se ajusta a las necesidades del proyecto en cuestión de desagregación

sectorial y regional dada la falta de datos homogeneizados sobre pérdidas de infraestructuras (u otro tipo de bienes de capital) derivadas de los impactos del cambio climático. Otros estudios presentan limitaciones en este aspecto, aunque se valoran para futuras líneas de trabajo.

En este estudio se determina el daño estimado anual (EAD, *Expected Annual Damage*) medido en euros constantes²⁰ de 2010. Esta variable cuantifica en unidades monetarias el daño causado (sin incluir adaptación) por eventos climáticos extremos o *hazards* sobre las infraestructuras críticas de 32 países. Los sectores considerados (y sus infraestructuras) se muestran en la Figura 14. En ella también se indica la asociación realizada entre los sectores del estudio (Forzieri et al., 2018) y los sectores representados en el modelo planteado en este TFG. Por ejemplo, en algunos casos, como en el sector minero, se ha asociado el sector del estudio original con varios sub-sectores, tal y como se ha indicado en la imagen. Para más información acerca del significado de cada sub-sector ver “Anexo A”.

Los eventos climáticos considerados por Forzieri et al. (2018) son siete: olas de frío y de calor, sequías, incendios, inundaciones de aguas continentales, elevación del nivel del mar y tormentas de viento. Los daños asociados a cada evento se han considerado de forma independiente, es decir, no se han modelado efectos en cascada, por lo que estos daños son aditivos. El estudio se realiza para cuatro periodos de tiempo que abarcan desde 1981 hasta 2100 con un periodo de muestreo de 29 años. El primer periodo de tiempo se emplea como periodo base o *baseline* del que se obtienen datos de frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos para inferir conclusiones sobre su frecuencia e intensidad futura empleando métodos de análisis de valores extremos (Forzieri et al., 2016).

²⁰ Los precios corrientes son aquellos que evolucionan a lo largo del tiempo acorde a la inflación mientras que los precios constantes se calculan respecto a un año base y se referencian todos a este año para eliminar el efecto de la fluctuación de los precios (Economipedia, s. f.). De esta forma todas las medidas son comparables.

Figura 14

Asociación entre las infraestructuras de Forzieri y los sectores del modelo.

| Sub-sectors | Correspondence with the TFG model | Layer (Forzieri's Estimates) |
|--|--|------------------------------|
| 05, 09, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 24, 06, 07, 08 | Mining | Minerals |
| 21 | Refinery | Refineries |
| 22 | Chemicals | Chemical |
| 25, 26 | Metals | Metals |
| 32 | Production of electricity by coal | Coal power plants |
| 33 | Production of electricity by gas | Gas power plants |
| 34 | Production of electricity by nuclear | Nuclear power plants |
| 37 | Production of electricity by petroleum | Oil power plants |
| 40 | Other types of electrical energy production | Biomass power plants |
| 35 | Production of electricity by hydro | Hydro power plants |
| 38, 39 | Production of electricity by solar photovoltaic and solar thermal | Solar power plants |
| 36 | Production of electricity by wind | Wind power plants |
| 41 | Transmission, distribution and trade of electricity | Electricity transport |
| 49 | Transport via pipelines | Gas pipelines |
| 44 | Water and waste | Water/Waste management |
| 59 | Education | Education |
| 60 | Health | Health |
| 57 | Other business sector services, including mining support services and supporting and auxiliary transport activities. | Roads |
| | | Rails |
| | | Inland waterways |
| | | Ports |
| | | Airports |

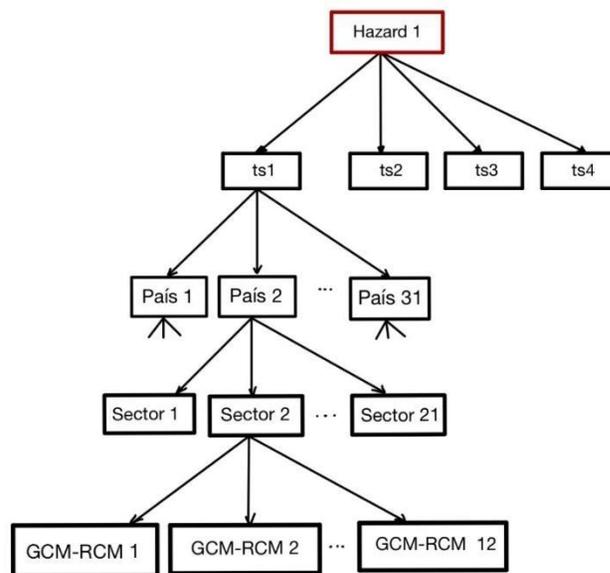
Fuente: elaboración propia.

Otros estudios emplean esta misma metodología para caracterizar los daños derivados de esta clase de eventos debido a que este tipo de distribuciones de probabilidad responden bien a la naturaleza episódica de estos sucesos (Franzke, 2021). La proyección del clima en Europa y los correspondientes eventos climáticos se generan a partir de distintas combinaciones de modelos GCM (*Global Circulation Model*) y RCM (*Regional Circulation Model*) en un escenario *business-as-usual*. Los modelos GCM y RCM se basan en las leyes fundamentales de la fluidomecánica en combinación con métodos numéricos; el resultado de las simulaciones es el clima en un cierto periodo de tiempo con distintos niveles de resolución (global y regional).

Ya se ha mencionado que en el estudio (Forzieri et al., 2018) se cuantifica el daño sobre las denominadas infraestructuras críticas, estas son: los sistemas de transporte, las plantas de generación de energía, industrias, redes de suministro de agua, educación y salud. No se incluye en el EAD el coste de la destrucción de la maquinaria que estas infraestructuras, públicas o privadas, puedan contener en su interior. En la Figura 15 se presenta la estructura de la base de datos de forma esquemática.

Figura 15

Esquema de la base de datos



Fuente: elaboración propia.

El nivel de desagregación de la base de datos es una gran ventaja a la hora de calcular funciones de daño específicas para cada sector y país. Sin embargo, esta misma cualidad hace que el proceso de tratamiento de datos sea computacionalmente muy costoso y difícil de automatizar, la base dispone de aproximadamente 70000 filas y su tamaño incrementa conforme avanza el proceso metodológico. Cabe destacar que para cada evento climático extremo se emplean distinto

número de modelos climáticos GCM-RCM²². De este modo, se ha considerado cada conjunto evento/periodo/región/sector como una población de 5 a 12 elementos dependiendo del número de modelos empleados a estimar el evento considerado. En la Tabla 1 se muestra un ejemplo de población para el periodo “ts1” (1981-1990), país España, sector “ET1” (líneas eléctricas de transporte) y evento *flood* (inundaciones de aguas continentales).

Tabla 1

Ejemplo de población para España, primer periodo.

| Región | Modelo climático | Infraestructura | Periodo | Daño Estimado 2010 € |
|--------|------------------|-----------------|---------|----------------------|
| ESP | C4_M3 | ET1 | ts1 | 7340224 |
| ESP | CN_GE | ET1 | ts1 | 7433046 |
| ESP | DM_CM | ET1 | ts1 | 7287243 |
| ESP | DM_GE | ET1 | ts1 | 7348322 |
| ESP | DM_M5 | ET1 | ts1 | 7348779 |
| ESP | ET_M3 | ET1 | ts1 | 7383851 |
| ESP | KN_M5 | ET1 | ts1 | 7308710 |
| ESP | ME_M3 | ET1 | ts1 | 7438481 |
| ESP | MP_M5 | ET1 | ts1 | 7296620 |
| ESP | SM_CM | ET1 | ts1 | 7362685 |
| ESP | SM_M3 | ET1 | ts1 | 7401213 |
| ESP | SM_M5 | ET1 | ts1 | 7280019 |

La columna “Daño Estimado 2010 €” es la variable EAD. Para el periodo *ts1* la población puede ajustarse por una distribución normal, es decir, todos los modelos predicen aproximadamente el mismo daño económico sobre la infraestructura ET1 de España. En apartados sucesivos se caracterizan las poblaciones a través de medidas de resumen numéricas (media y mediana) y medidas de variabilidad y sesgo.

²² Se usan modelos climáticos que son resultado de vincular un modelo global (GCM) con uno regional (RCM).

2.2.2. *Generación de la Base de Datos*

La magnitud de la variable EAD, tal y como se recoge en la base de datos se expresa en valor absoluto (es decir, unidades monetarias). Debido a que las funciones de daño representan un porcentaje de daño en función de un indicador climático, resulta necesario relativizar esta variable (EAD) y expresarla en daño porcentual.

$$\text{Daño relativo (\%)} = f(\text{indicador climático}) \quad (7)$$

Para que resulte coherente con el resto del módulo económico, la información expresada en euros constantes de 2010 se ha transformado a euros constantes de 2015 (año base de simulación) a través del Índice de Precios al Consumidor (IPC) de cada país involucrado en el estudio, lo que se denota con el subíndice *i*.

$$\text{EAD}(\text{€ ctes. 2015})_i = \text{EAD}(\text{€ ctes. 2010})_i \cdot \frac{\text{IPC}_{2015_i}}{\text{IPC}_{2010_i}} \quad (8)$$

Los datos de IPC se han obtenido de la base de datos proporcionada por (Eurostat, s. f.), donde se trabaja con el IPC armonizado o HIPC.

Una vez obtenido el daño estimado anual en euros de 2015 se transforma a dólares de 2015 (nuevamente por motivos de coherencia con el resto del modelo), empleando el ratio de intercambio que proporciona Eurostat para ese año ($1\text{€} = 1.1095\text{\$}$ en 2015).

$$\text{EAD} (\text{\$ ctes. 2015})_i = \text{EAD}(\text{€ ctes. 2015}) \cdot \frac{1.1095 \text{ \$}}{1 \text{ €}} \quad (9)$$

Para relativizar la variable EAD se trabaja con una base de datos en la que se recoge información sobre el capital físico de cada sector que tiene en cuenta el módulo económico para cada uno de los países de estudio. El stock de capital o *capital stock* es la suma del capital dedicado a infraestructuras y el capital dedicado a maquinaria de un determinado sector (y en menor medida

se incluye una parte de capital no tangible), mientras que la variable EAD sólo contabiliza el daño sobre el capital de infraestructuras. De esta forma, el daño porcentual se calcula como sigue:

$$\text{Daño relativo a las infraestructuras } (\%)_{i_r} = \frac{\text{EAD } (\$ \text{ ctes. 2015})_{i_r}}{\text{Capital stock}_{i_r}} \quad (10)$$

Donde los subíndices i y r se refieren al sector y región respectivamente. Esta operación se realiza para cada EAD proporcionado por cada modelo GCM-RCM.

Una vez obtenida la variable RD o daño relativo (variable explicada) se asocia con la variable GMST. Cada dato de RD está ligado a uno de los cuatro periodos en los que se realiza el estudio que a su vez se pueden relacionar con un nivel de incremento de temperatura global (respecto a niveles preindustriales). El IPCC ofrece datos de incremento medio de temperatura global para cada periodo de estudio y bajo el mismo escenario *bussines-as-usual* (*GCM data archive*, s. f.), de esta forma se obtiene la Tabla 2.

Tabla 2

Relación Δ GMST -- periodo

| | Periodo | Δ GMST [°C] |
|-----|-----------|--------------------|
| ts1 | 1981-2010 | 0,41 |
| ts2 | 2011-2040 | 1,06 |
| ts3 | 2041-2070 | 2,11 |
| ts4 | 2071-2100 | 2,98 |

Tras un proceso de *downscaling* se obtienen los coeficientes que relacionan la covariable incremento de temperatura media superficial global (GMST) con la respectiva variable de incremento de temperatura media superficial regional (RMST), que es la que se necesita como variable explicativa del RD desagregado por regiones. Estos coeficientes no se han calculado en

el marco de este TFG, sino que han sido tomados del proyecto LOCOMOTION. Se expresan a través de la siguiente relación:

$$\text{Coeficiente de interpolación}_r = \frac{\Delta T^a \text{ media regional}_r}{\Delta T^a \text{ media global superficial}_r} \quad (11)$$

Donde el subíndice r representa cada región de estudio. Estos coeficientes se han empleado para calcular la variable explicativa (RMST) de este trabajo de la siguiente forma:

$$\text{RMST}_t = \text{coeficiente de interpolación}_r \cdot \text{GMST}_t \quad (12)$$

Donde los subíndices t y r hacen referencia al periodo de tiempo y a la región, respectivamente.

En la Tabla 3 se muestra la misma población de la Tabla 2 pero habiendo sido realizadas todas las operaciones descritas anteriormente.

Tabla 3

Ejemplo de población una vez construida la base de datos

| Región | Modelo climático | Infraestructura | Periodo | RMST | Daño Estimado 2010 € | Daño Estimado 2015 \$ | Stock de Capital \$ 2015 | Daño Relativo % |
|--------|------------------|-----------------|---------|--------|----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------|
| ESP | C4_M3 | ET1 | ts1 | 0.5248 | 7340224 | 8656439.762 | 2.43118E+11 | 0.003561% |
| ESP | CN_GE | ET1 | ts1 | 0.5248 | 7433046 | 8765906.183 | 2.43118E+11 | 0.003606% |
| ESP | DM_CM | ET1 | ts1 | 0.5248 | 7287243 | 8593958.449 | 2.43118E+11 | 0.003535% |
| ESP | DM_GE | ET1 | ts1 | 0.5248 | 7348322 | 8665989.859 | 2.43118E+11 | 0.003565% |
| ESP | DM_M5 | ET1 | ts1 | 0.5248 | 7348779 | 8666528.806 | 2.43118E+11 | 0.003565% |
| ESP | ET_M3 | ET1 | ts1 | 0.5248 | 7383851 | 8707889.758 | 2.43118E+11 | 0.003582% |
| ESP | KN_M5 | ET1 | ts1 | 0.5248 | 7308710 | 8619274.814 | 2.43118E+11 | 0.003545% |
| ESP | ME_M3 | ET1 | ts1 | 0.5248 | 7438481 | 8772315.763 | 2.43118E+11 | 0.003608% |
| ESP | MP_M5 | ET1 | ts1 | 0.5248 | 7296620 | 8605016.89 | 2.43118E+11 | 0.003539% |
| ESP | SM_CM | ET1 | ts1 | 0.5248 | 7362685 | 8682928.367 | 2.43118E+11 | 0.003571% |
| ESP | SM_M3 | ET1 | ts1 | 0.5248 | 7401213 | 8728365.033 | 2.43118E+11 | 0.003590% |

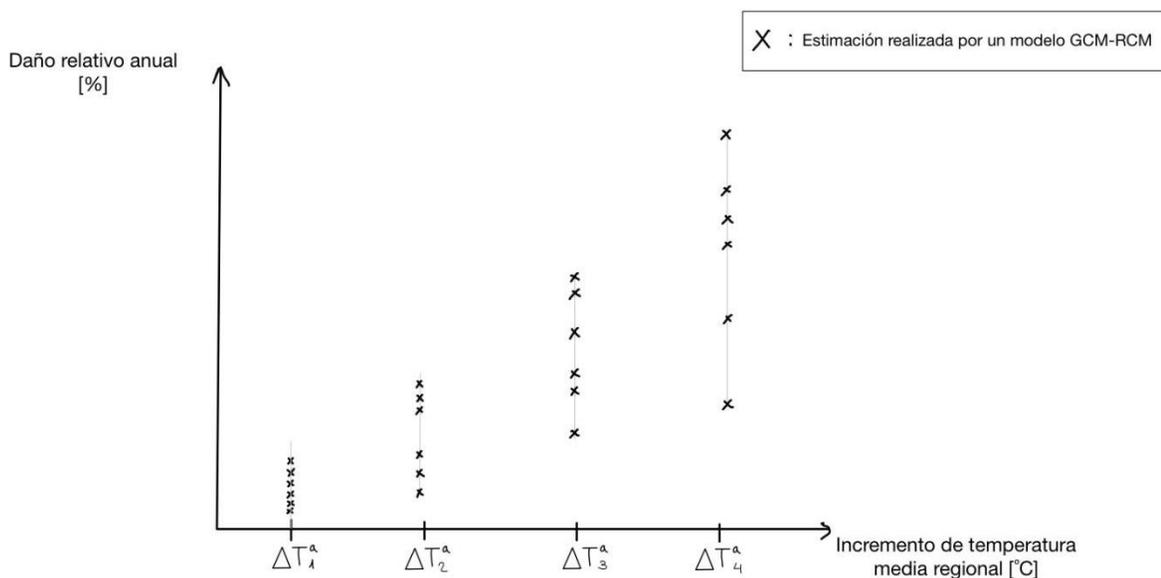
Las operaciones efectuadas hasta el momento se han programado empleando el software EXCEL. Se ha utilizado esta herramienta con el objetivo de que la base de datos generada sea útil en posteriores estudios en los que trabajen otras personas, ya que por lo general EXCEL presenta

pocas barreras de entrada para su uso (no se requieren conocimientos de programación demasiado avanzados o específicos). Además, debido a que se están realizando miles de operaciones, se necesita una programación eficiente que permita trabajar de forma dinámica con la base de datos. La programación de estas operaciones y la relación entre las variables se ha hecho con funciones anidadas y funciones condicionadas de tal forma que la modificación de un dato de partida actualice de forma automática toda la base de datos.

Hasta el momento se tiene la variable de daño relativo anual asociada con un determinado incremento de temperatura media regional tal y como se muestra en la Figura 16.

Figura 16

Incremento de temperatura regional asociado al daño relativo



Fuente: Elaboración propia.

Las cruces representan las estimaciones de daño realizadas por cada modelo climático GMC-RCM en cada periodo, a su vez asociado a un determinado incremento de temperatura.

El siguiente paso es caracterizar las poblaciones a través de alguna medida de tendencia central y de dispersión que describa el comportamiento de la población.

2.2.3. *Análisis de Incertidumbre de los Datos*

Las estimaciones realizadas por las diferentes combinaciones de modelos climáticos regionales y globales deberían ser parecidas para cada conjunto región/sector en cada periodo. Es decir, idealmente, la variable EAD debería seguir una distribución normal. En el periodo base (ts1) los modelos climáticos se basan en históricos de datos y por esta razón, en este periodo, las estimaciones realizadas por todas las combinaciones GCM-RCM son muy parecidas o idénticas, existiendo una dispersión poblacional muy reducida o nula para todos los tipos de eventos climáticos, sectores y regiones. En el resto de los periodos, en los que los modelos climáticos deben desarrollar una labor predictiva, la dispersión de las poblaciones aumenta. Este hecho puede confirmarse a través de un análisis visual de los datos por sector/región como se muestra en las Figuras 17 y 18 donde se representa el daño promedio estimado en cada periodo de tiempo para el sector refinería de España y un sector energético de Bélgica, asociado a sequías y olas de calor, respectivamente. En cada punto se indica en color negro la desviación típica asociada.

Figura 17

Evolución del RD y su desviación típica en España. Sector del refino.

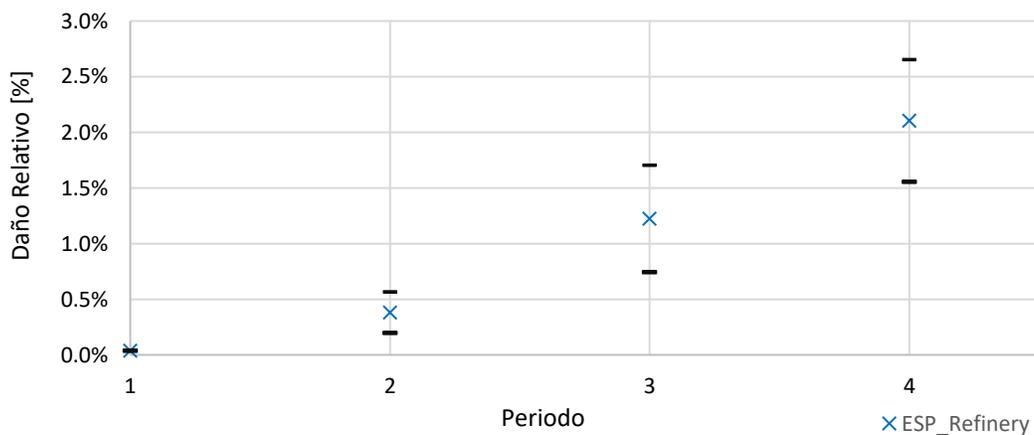
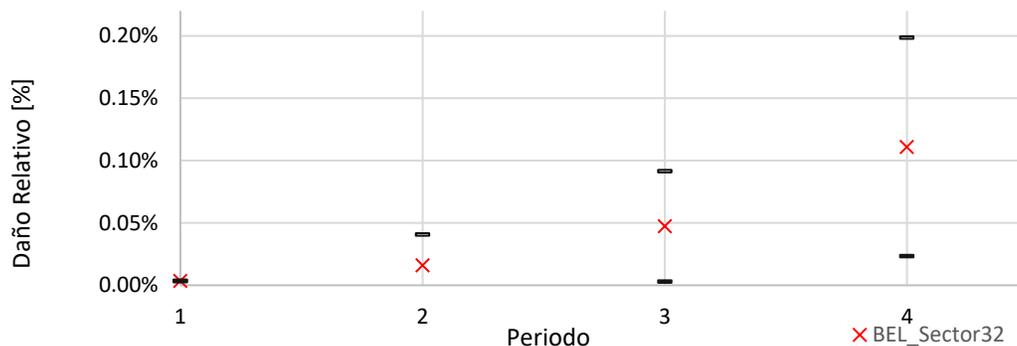


Figura 18

Evolución del RD y su desviación típica en Bélgica. Sector del petróleo



Nota. El sector energético de la imagen corresponde a las plantas de producción de energía con petróleo.

Como puede observarse, a medida que aumenta el horizonte temporal predictivo de los modelos la desviación típica de los datos (líneas horizontales negras) también aumenta. Este comportamiento se observa en la mayoría de los eventos climáticos y en menor medida en las olas de frío. Este fenómeno también es advertido en el estudio de origen (Forzieri et al., 2018) donde se admite que la incertidumbre que introducen los modelos climáticos es elevada y se referencia un artículo donde se detallan las posibles causas que producen dicha dispersión.

Debido a lo anterior, la representatividad de los daños disminuye y los parámetros de las funciones de daño están sujetos a más incertidumbre. Además, el escaso número de elementos que componen las poblaciones (en ocasiones solamente 5 elementos) hace complicado evaluar fielmente si las poblaciones provienen efectivamente de una distribución normal o no. Pese a este inconveniente se ha optado por realizar la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, apta para poblaciones entre tres y cinco mil elementos, haciendo uso de una función de MATLAB (“swtest”), con un nivel de confianza “ α ” del 0.05. Se plantea como hipótesis nula que la población proviene de una distribución normal. Se realiza este análisis con el objetivo de intuir un posible

sesgo de las poblaciones y evaluar qué medida de tendencia central es más representativa, si la media o la mediana.

Figura 19

Script para la aplicación de la prueba de Shapiro Wilk

```

Acepta_Rechaza = []; % Guarda el valor de la variable booleana que indica si se
acepta/rechaza la hipótesis nula.
Poblacion      = [];
Cnt            = 0; % Se inicializa la variable contador. Número de poblaciones con H=1
Cnt_0         = 0; % Se inicializa la variable contador. Número de poblaciones con H=0
for i =1:num_models:length(Results_RD) % Results_RD almacena los datos de daño [%]
    Poblacion = str2double(Results_RD(i:i+num_models-1,1))
    if mean(Poblacion)-Poblacion(1)==0%Si todos los elementos del vect. son iguales
        H=1;
    elseif isnan(Poblacion) % Si el vector contiene valores "NaN" no se contabiliza
        H = -1;
    else
        [H,pValue,w]=swtest(Poblacion) % Se aplica "swtest" con Alpha = 0.05
    end
    Acepta_Rechaza = [Acepta_Rechaza;H]
end
% Se contabiliza el número de H = 1 y H = 0
for i =1:1:length(Acepta_Rechaza)
    if Acepta_Rechaza(i) == 1
        Cnt = Cnt + 1;
    elseif Acepta_Rechaza(i) == 0;
        Cnt_0 = Cnt_0 + 1;
    end
end
end

```

Fuente: elaboración propia mediante el software MATLAB

De la aplicación de esta metodología se obtiene que en aproximadamente un 77% de todas las poblaciones (relativas a todos los eventos climáticos) se rechaza la hipótesis nula. Dicho de otra forma, el test de Shapiro Wilk concluye que sólo un 23% de las poblaciones provienen de una distribución normal. Este porcentaje supone aproximadamente un cuarto de las poblaciones, muy probablemente relativas al primero de los cuatro periodos (donde no hay labor predictiva). Se concluye por tanto que la caracterización del daño a partir de una medida de tendencia central como el promedio y una medida de dispersión como la desviación típica no es una fiel representación del daño y su incertidumbre para todas las poblaciones por lo que es necesario

plantear una nueva estrategia que recoja la dispersión de los datos y caracterice su tendencia central.

Una vez se concluye que la mayoría de las distribuciones no provienen de una distribución normal, se evalúa y caracteriza el sesgo de las poblaciones. Este aspecto es importante porque arroja información sobre qué medida de tendencia central es la más adecuada y, además, permite averiguar la tendencia de las estimaciones de los modelos climáticos, es decir, si para una misma población la probabilidad de encontrar un daño de una magnitud elevada es mayor o menor que la probabilidad de encontrar un daño de una magnitud reducida.

El sesgo o asimetría poblacional, es una cualidad fácilmente distinguible mediante análisis visual en diagramas de caja o histogramas, aunque también existen estadísticos que resumen la asimetría en un número que generalmente da cuenta de la magnitud del sesgo y de su sentido (positivo o negativo).

Si se toman poblaciones al azar de los periodos dos, tres y cuatro y se realizan los histogramas pertinentes, se observa el comportamiento de las Figuras 20, 21 y 22 donde se hace evidente la existencia de asimetrías en las poblaciones, con una clara tendencia hacia valores de daño reducidos.

Figura 20

Histograma de una población del periodo dos.



Figura 21

Histograma de una población del periodo tres.

**Figura 22**

Histograma de una población del periodo cuatro.



Al estar tratando un elevado número de datos, no resulta factible realizar histogramas para cada población. En consecuencia, se ha empleado una medida de resumen numérica que evalúe el sesgo y que pueda programarse para su aplicación automática en todas las poblaciones. El estadístico elegido es el coeficiente de asimetría de Fisher:

$$\gamma = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (13)$$

Se ha elegido este estadístico por su sencillez de cálculo ya que solo necesita el número de elementos de la población (n), la media (\bar{x}), así como el valor de los propios elementos poblacionales (x_i). Si se presta atención a la fórmula se puede deducir que el coeficiente de asimetría de Fisher mide las desviaciones de los datos respecto a la media y otorga un “peso” (γ) a dicha desviación. Un inconveniente de este coeficiente es que dicho “peso” no se limita a un rango de valores, no está entre 0 y 1 (por ejemplo), por lo que puede servir para constatar si existe

asimetría y si esta es positiva o negativa, pero es complicado evaluar la magnitud de dicho sesgo sin un análisis visual profundo.

El estadístico se interpreta de la siguiente manera:

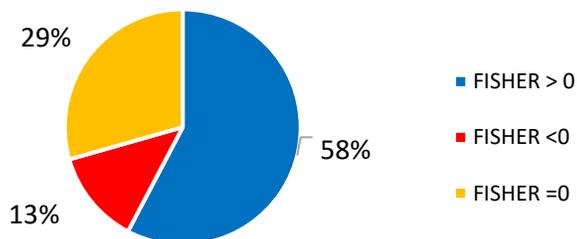
- Si $\gamma = 0$ (o muy próximo), la población es simétrica.
- Si $\gamma < 0$, la población presenta asimetría negativa (cola a la izquierda)
- Si $\gamma > 0$, la población presenta asimetría positiva (cola a la derecha)

Se han programado las operaciones para todas las poblaciones relacionadas con todos los tipos de eventos climáticos extremos, los resultados se muestran a continuación:

Para el evento de inundaciones de aguas continentales (Figura 23) el análisis de asimetría resulta en un 58% de poblaciones con desviación asimétrica positiva con coeficientes de Fisher comprendidos entre [0.25, 3.25].

Figura 23

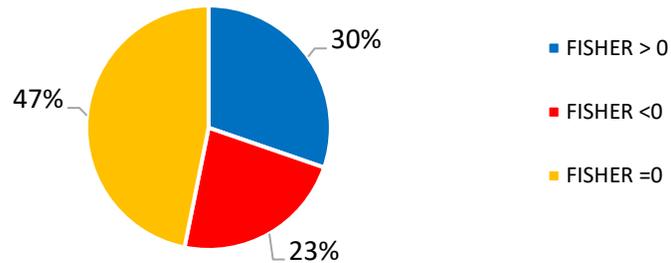
Coefficiente de asimetría de Fisher para inundaciones de interior.



Para el evento de olas de frío (Figura 24) el análisis de asimetría resulta en un 47% de poblaciones simétricas o con un coeficiente próximo a cero. Esto no resulta demasiado extraño ya que se sabe que las olas de frío es un fenómeno cuya intensidad y frecuencia irá disminuyendo con el calentamiento global, por lo que todos los modelos pronostican daños reducidos y parecidos. Pese a esto no se puede destacar un tipo de asimetría en este evento.

Figura 24

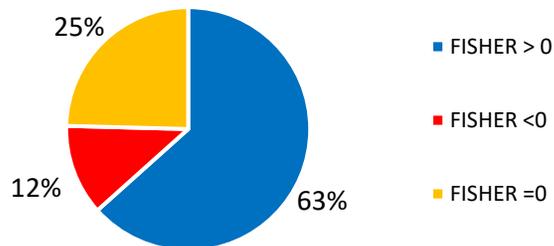
Coefficiente de asimetría de Fisher para olas de frío.



Por su parte, las poblaciones asociadas a las sequías presentan nuevamente un alto componente de asimetría positiva (63%) como puede observarse en la Figura 25.

Figura 25

Coefficiente de asimetría de Fisher para sequías.

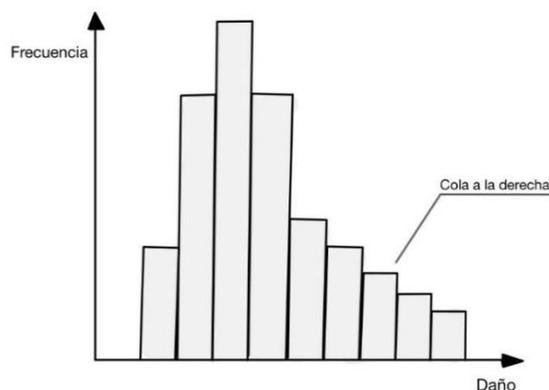


Los eventos relacionados con incendios también presentan mayoritariamente asimetría positiva y se ha observado el mismo comportamiento para las olas de calor.

En base a los resultados obtenidos se puede concluir que en las poblaciones existe un sesgo muy pronunciado, que en gran medida justifica la dispersión de los datos. El tipo de poblaciones que se tienen son del tipo de la Figura 26.

Figura 26

Histograma representativo de la asimetría positiva,



Fuente: Elaboración propia.

Este resultado cuadra también con lo observado por medio de los histogramas de la Figura 20, 21 y 22 para poblaciones elegidas aleatoriamente.

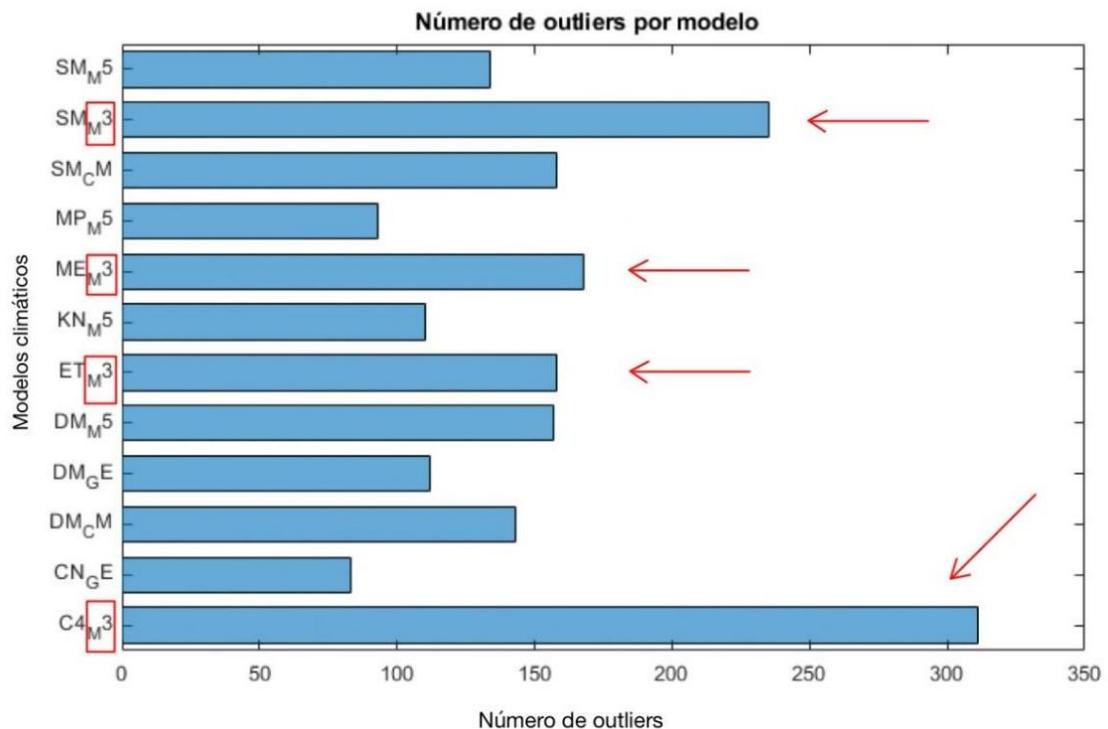
Del estudio de la asimetría se puede concluir que la mediana es, en la mayoría de los casos, el mejor estadístico para representar la tendencia central ya que las poblaciones no son gaussianas y además presentan sesgo.

Siguiendo con la exploración de los datos de partida, se ha elegido el evento climático que dispone de una mayor cantidad de datos (inundaciones de aguas continentales, *floods*) y se ha analizado aquellos valores más alejados de la media intentado asociarlos con algún factor (región, sector, modelo...) para comprobar si, por ejemplo, son introducidos sistemáticamente siempre por la misma combinación GCM-RCM. Este análisis se ha realizado utilizando la función “isoutlier” de MATLAB y se ha definido como *outlier* aquel punto que difiera más de tres desviaciones típicas de la media. Con esta función se ha detectado que aproximadamente un 8% de los valores de *floods* son atípicos. Los resultados de este análisis se muestran en la Figura 27, donde puede observarse que el modelo que más puntos alejados tres desviaciones típicas de la media introduce es el

“C4_M3”. Pese a ello, no se puede decir que sea el único modelo que introduce valores atípicos ya que un gran número de ellos se distribuye por el resto de los modelos sin encontrar un patrón aparente. Sin embargo, aunque no existe una única combinación GCM-RCM que justifique todos o la mayoría de los valores atípicos, sí se puede asociar un gran número de ellos al modelo climático global o GCM denominado “M3” o “HadCM3”. Este modelo ha sido empleado en múltiples proyectos, así como en informes recientes del IPCC avalados por un gran número de científicos. Por este motivo y por el gran sesgo que supondría la eliminación de los datos asociados a estos modelos, se ha optado por tomar medidas menos invasivas para tratar los puntos atípicos y la incertidumbre asociada a la dispersión, que no supongan minorar aún más las poblaciones.

Figura 27

Datos atípicos introducidos por modelos climáticos para inundaciones

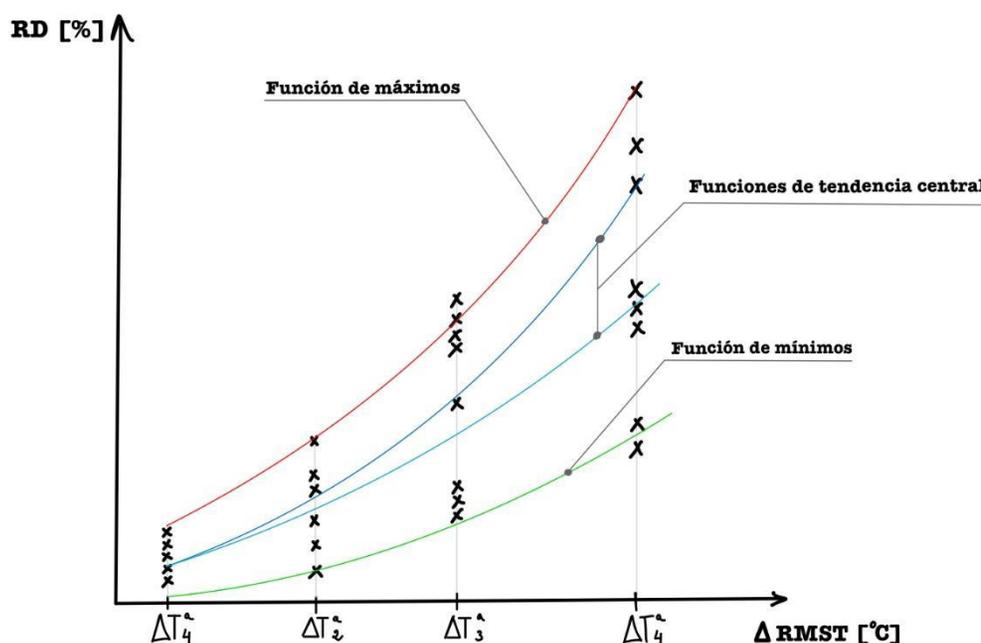


Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de todo el análisis de incertidumbre expuesto, se ha propuesto recoger la dispersión de los datos mediante el cálculo de funciones de daño para datos máximos, mínimos y promedios. Además, se ha incluido la mediana como otra medida de tendencia central que pudiera ser también representativa para gran parte de las poblaciones. Por esta razón se va a analizar por separado las distintas proyecciones de los daños desde las más optimistas (mínimas) hasta las más pesimistas (máximas), con funciones, también específicas, para la media y la mediana (ver Figura 28).

Figura 28

Funciones calibradas en base a las distintas estimaciones GCM-RCM.



Fuente: Elaboración Propia.

2.2.4. Generación del Algoritmo para la Calibración de Funciones

En el ámbito del proyecto para el que se generan las funciones de daño de este trabajo fin de grado, se demanda que la programación de la base de datos y del algoritmo de calibración se

realice de tal forma que su uso sea dinámico y automático, posibilitando la modificación de factores y obtención de resultados de una forma sencilla. A continuación, se va a exponer cómo se ha planteado la lógica de programación para cumplir con estos objetivos incluyendo algunos extractos de código.

La base de datos para la cual se efectúan las calibraciones es extensa pero también muy diversa, los datos de cada evento tienen una periodicidad distinta y además no todos evalúan los mismos sectores, aunque sí las mismas regiones. Para solventar este hecho se ha programado el grueso del código de forma simbólica y en los pasos iniciales se le pide al usuario que elija diversas opciones de calibración para, en base a su elección, asignar uno u otro valor a dichas variables simbólicas.

Se comienza pidiendo al usuario que elija el evento climático del que desea calibrar funciones. Para ello, simplemente debe poner un “1” en la variable correspondiente (Figura 29).

Figura 29

Código para la elección del evento para la calibración.

```

%% ELECCIÓN DEL EVENTO CLIMÁTICO PARA REALIZAR LA CALIBRACIÓN
Floods      = 1;
Heat_waves  = 0;
Cold_waves  = 0;
SLR         = 0;
Drought     = 0;
Fire        = 0;

```

Fuente: elaboración propia median el software MATLAB

Seguidamente se comprueba qué opción ha sido elegida con varios “if” y “elseif” (Figura 30), una respuesta afirmativa activa la carga de datos desde archivos “.mat” generados previamente con la información de la base de datos en EXCEL. Después de cargar los datos se reordena la información contenida en los “.mat” en distintas variables que se usarán más adelante.

Figura 30

Código para la asignación de datos a las variables

```

if Floods == 1;

% CARGA DE DATOS DE LA BASE
load Data_Floods.mat
load Data_CapitalStock_Floods.mat
load Regions32.mat

% VARIABLES : se extraen los datos de las variables del "Data" asociado a FLOODS
iter = 0;
Sectors_compare = ["Sector 32";"Sector 33";"Sector 34";"Sector 37";"Sector 40";"Sector
35";"Sector 41";"Chemicals ";"Metals";"Mining and quarrying";"Water and
waste ";"Refinery ";"Sector 59";"Sector 60";"Sector 57"];

% Se asigna información del DATA a las variables
RMST = table2array(Data(:,5));
RD = table2array(Data(:,6));
ClimateModel = string(table2array(Data(:,2)));
ClimateModel_compare = ClimateModel(13:24);
Region = string(table2array(Data(:,1)));
Sector = string(table2array(Data(:,3)));
CapitalStock = table2array(Data_CapitalStock);
num_models = 12;
num_modelsAUT = 11;
n_datos = num_models * 4; % nº de modelos x nº de periodos

```

Fuente: elaboración propia mediante el software MATLAB

El código que se muestra en la Figura 30 se ha programado para cinco de los siete eventos climáticos del estudio (Forzieri et al., 2018), excluyendo las inundaciones costeras y las tormentas de viento. Esta fase es esencial para la automatización del proceso. Posteriormente se pide al usuario que elija el escenario de incertidumbre para el que quiere calcular funciones, siguiendo el mismo procedimiento que el expuesto en la Figura 29 y se pasa a una fase de reordenación de los vectores (Figura 31) para facilitar los posteriores cálculos.

Figura 31

Código para la reordenación de datos

```

%% REORDENACIÓN DEL VECTOR DE DAÑOS RELATIVOS
% Se construye un vector Bat_RD con el RD de un sector k /pais j con todos los datos de cada
modelo climático.
for j = 2:1:length(Regions_compare)
    for k = 1:1:length(Sectors_compare)

```

```

    for i = 2:1:length(Region)
        if Region(i) == Regions_compare(j) & Sector(i) == Sectors_compare(k)
            Bat_RD      = [Bat_RD;RD(i)];
            Bat_RMST    = [Bat_RMST;RMST(i)];
            Bat_Regiones = [Bat_Regiones; Regions_compare(j)];
            Bat_Sectores = [Bat_Sectores; Sectors_compare(k)];
            Bat_CapitalStock = [Bat_CapitalStock;CapitalStock(i)];
            iter = iter +1
        end
    end
end
end
end
Results_RD = [Bat_RD Bat_RMST Bat_Regiones Bat_Sectores] % [RelativeDamage temperatura Región
Sector]

```

Fuente: elaboración propia mediante el software MATLAB

Como salida se obtiene un vector “Results_RD” que contiene en cada columna la información de daño relativo, su temperatura asociada, la región y el sector en que se producen. Este vector sigue una estructura determinada y se han agrupado los datos para que toda la información relativa a un país esté junta y no dispersa por el vector, como originalmente ocurría en la base de datos de EXCEL. Este proceso es el mismo para cualquier evento.

Una vez el vector ha sido reorganizado se procede a la detección de posibles datos atípicos y su sustitución por diversos métodos. Para ello se usa una función propia del entorno denominada “isoutlier” (para la detección) y “filloutlier” (para la sustitución) y se genera un nuevo vector “Total_results” (Figura 32) en el que se almacena el vector modificado, sin datos atípicos. Este paso es opcional, solo se realiza si el usuario desea calibrar las funciones con la eliminación de esta clase de puntos.

Figura 32

Código para la detección y sustitución de punto atípicos

```

                                %% DETECCIÓN OUTLIERS y REEMPLAZO DE LOS MISMOS
for q =1:num_models:length(Bat_RD)
    outliers      = [outliers;isoutlier(Bat_RD(q:q+num_models-1))];
    Bat_RD_filloutliers = [Bat_RD_filloutliers;filloutliers(Bat_RD(q:q+num_models-
1), 'linear', 'mean')]; % Se sustituye el outlier con un interpolación lineal
end
for i =1:length(outliers)/num_models
    Modelos = [Modelos;ClimateModel_compare];
end

```

```

outliers = [outliers Modelos];
Total_results = [Results_RD Bat_RD_filloutliers outliers]; % [RelativeDamage Temperatura
Región Sector RD_filloutlier Outliers=1 Modelos]
disp('OK')

                % CÁLCULO DEL PROMEDIO DE LOS 4 PERIODOS PARA LOS R^2 < 0,5
for i = 1:n_datos:length(Results_RD)
    MeanforR2bajos = [MeanforR2bajos;mean(str2double(Results_RD(i:i+n_datos-1,1)))];
end
MeanforR2bajos = string(MeanforR2bajos);

```

Fuente: elaboración propia mediante el software MATLAB

Sin embargo, sí es necesario el cálculo del promedio de los daños de todos los periodos para cada región/sector y evento, debido a que este dato se va a usar posteriormente en caso de que la regresión no resulte representativa. Si esto sucede, no se asigna ninguna dinámica (o función) al daño de la región/sector correspondiente ya que se asume que el indicador no es suficientemente explicativo, no obstante, se asigna la media (sin dinámica) por no caer en una infravaloración excesiva de los daños.

El siguiente paso que se ejecuta en el código es relativo al cálculo de los máximos, mínimos, mediana y promedio de cada región/sector, según la opción que se haya seleccionado anteriormente. En este momento se han resumido los 5-12 datos de cada periodo (Figura 16) en un solo punto por periodo (ya sea el máximo, el promedio etc.) por lo que se dispone de cuatro puntos de daño, y su respectivo incremento de temperatura asociado, para realizar las regresiones.

El “corazón” del algoritmo se sitúa en esta fase, todo lo anterior se podría resumir en un tratamiento de datos preliminar para poder introducir los puntos “x” e “y” de forma lógica en la función de MATLAB que realiza las regresiones (Figura 33).

Figura 33

Código para realizar regresiones en MATLAB

```

                % FORMAS FUNCIONALES CONSIDERADAS
modelfun_lineal      = @(b,x) b(1) * x + b(2)
modelfun_polinomial = @(b,x) b(1) * x.^2 + b(2) * x + b(3)
modelfun_potencial  = @(b,x) b(1) * x.^b(2)
modelfun_logistica  = @(b,x) 1./(1+b(1).*exp(x.*(-b(2))))

```

```

%modelfun_exponencial = @(b,x) b(1) * exp(x * b(2))
%modelfun_logistica   = @(b,x) b(4) .* (1 + b(1) * exp(-b(2).*x)) ./ (1 + b(3) * exp(-
b(2).*x))
%modelfun_logaritmica = @(b,x) b(1) * log(x * b(2))
%modelfun_racional    = @(b,x) (b(1) + b(2) * x) ./ (b(3) * x)
%modelfun_racional    = @(b,x) (b(1) + b(2) * x) ./ (b(3))

[...]

% LINEAL
if y(n1:n1+3) == zeros; %CRITERIO: si el sector/país no sufre daños su R2 = 2
R2_lineal = 2;
elseif isnan(y(n1:n1+3)) ; %CRITERIO: si el sector/país no tiene datos su R2 = -1
R2_lineal = -1;
Else
Mdl_lineal = fitnlm(x(n1:n1+3),y(n1:n1+3),modelfun_lineal,beta0)
R2_lineal = Mdl_lineal.Rsquared.Ordinary;
Parametros_lineal = [Mdl_lineal.Coefficients.Estimate;0]; % Se añaden ceros para que coincida
con el nº de parámetros mayor
% Residuals_lineal = Mdl_lineal.Residuals(:,1);
End

```

Fuente: elaboración propia mediante el software MATALB

En la Figura 33 se pueden apreciar dos partes; en la primera se proponen las formas funcionales (en verde las que se han probado y en negro las que finalmente se han utilizado por ser más simples y explicativas al usar únicamente una variable independiente). Estas son:

- Lineal: $y = \beta_1 x + \beta_2$ (14)

- Cuadrática: $y = \beta_1 x^2 + \beta_2 x + \beta_3$ (15)

- Potencial: $y = \beta_1 x^{\beta_2}$ (16)

- Logística: $y = \frac{1}{1 + \beta_1 e^{-\beta_2 x}}$ (17)

La segunda parte es un ejemplo, para la forma funcional lineal, en la que se introducen los datos en la función “fitnlm” que realiza las regresiones. De esta función se saca como salida el valor del estadístico R^2 y de los parámetros. Los mismos cuatro puntos con los que se ha hecho la regresión lineal mostrada en el ejemplo, vuelven a ser introducidos en la función para calcular la regresión con el resto de las formas funcionales propuestas, y del mismo modo, se guarda el valor del R^2 de todas ellas para posteriormente identificar la mejor forma funcional (Figura 34).

Figura 34

Código para identificar la mejor forma funcional

```

% SE CALCULA EL MÁXIMO R^2
R2_max = max(max(R2_lineal,R2_poly),max(R2_potencial,R2_logistica));
% Vector auxiliar, sus componentes tienen un orden determinado por el vector letra_R2
Vector_R2_n1 = [R2_lineal,R2_poly,R2_potencial,R2_logistica]
Vector_parametros_n1=[[Parametros_lineal'];[Parametros_polinomica'];[Parametros_potencial'];[P
arametros_logistica']]
% ASIGNACIÓN DE LA MEJOR FORMA FUNCIONAL
%Identificación del modelo con R2 máximo
[...]
elseif Vector_R2_n1(j) == R2_max % Se compara el vector ordenado Vector_R2_n1 con el que
contiene el R^2 máximo
    if indicador == 0
        Vector_modelo = [Vector_modelo letra_R2(j)]; % Si el elemento j coincide con el
máximo R2 se asigna el modelo en la posición j de letra_R2
        Vector_parametros = [[Vector_parametros]; [Vector_parametros_n1(j,:)]]; % Matriz
que contiene los parámetros con mejor R^2 -> [b(1),b(2),b(3)]
        indicador = indicador + 1; [...]

```

Fuente: elaboración propia con el software MATLAB

En la Figura 34 se calcula, primeramente, el máximo R^2 de entre todas las regresiones y se identifica su procedencia, es decir, qué forma funcional lo ha generado. Después se apilan en un vector (“Vector_parametros”) de forma permanente solamente los parámetros de la mejor forma funcional. Como ya se ha mencionado, si ninguna regresión supera un valor de R^2 de 0.5, entonces se asigna a dicha región/sector la forma funcional “Mean” (es decir, la media del daño en los cuatro periodos).

El algoritmo dispone de más funcionalidades asociadas al estudio de los datos y la detección de irregularidades. Por ejemplo, una parte del código sirve para evaluar la representatividad de los datos con y sin puntos atípicos. Fruto de esta indagación se ha comprobado que, pese a que el estadístico R^2 mejora ligeramente en las regresiones sin *outliers*, en realidad al eliminar estos puntos sucede que las regiones/sectores que acumulan mayor capital (las regiones con mayor exposición) quedan por debajo del límite de 0.5. Con datos atípicos, en cambio, las regiones/sectores por debajo del límite acumulan un capital pequeño. Por este motivo, y por los ya mencionados, se ha optado por realizar las regresiones sin la sustitución de *outliers* ya que se quiere

representar mejor, si es posible, aquellas regiones/sectores más expuestas (con el criterio de que sean éstas las de mayor capital).

2.3. Extrapolación de Resultados para Regiones/Sectores sin Datos

En esta sección se explica el método de extrapolación utilizado en (López Muñoz et al., 2021) para aquellos sectores y regiones para los que no se tienen datos debido a dos razones principales:

- En el estudio (Forzieri et al., 2018) no se contemplan el mismo número de regiones que en el modelo planteado en este trabajo fin de grado. Mientras que el estudio original abarca 32 regiones de la zona euro, en el prototipo utilizado para este trabajo se consideran además otras regiones como China, Rusia e India y compendios de países asociados utilizando criterios geopolíticos como EASOC (este de Asia y Oceanía), USMCA (Estados Unidos, México y Canadá) o LROW (otras regiones del mundo entre las que se encuentran países bastante variados, pero entre los que destacan el continente africano y Medio Oriente).
- Del mismo modo, en este estudio no se estiman daños para todos los sectores que se encuentran representados en el proyecto LOCOMOTION. En este proyecto se tiene en cuenta 62 sectores y en (Forzieri et al., 2018) se han considerado las infraestructuras de la Figura 14.

A continuación, se explica el proceso seguido para realizar las extrapolaciones sectoriales y regionales.

La metodología de extrapolación utilizada se ha extraído de (López Muñoz et al., 2021) y se encuentra aún en fase de desarrollo. Se ha considerado necesario extrapolar para aquellos países para los que no se dispongan datos ya que no incluir ningún daño sería como indicar que el daño es nulo en el modelo, lo cual sesgaría aún más los resultados. Por esta razón, se ha decidido asociar las regiones para las que no se tienen datos con regiones europeas para las que sí se tienen datos,

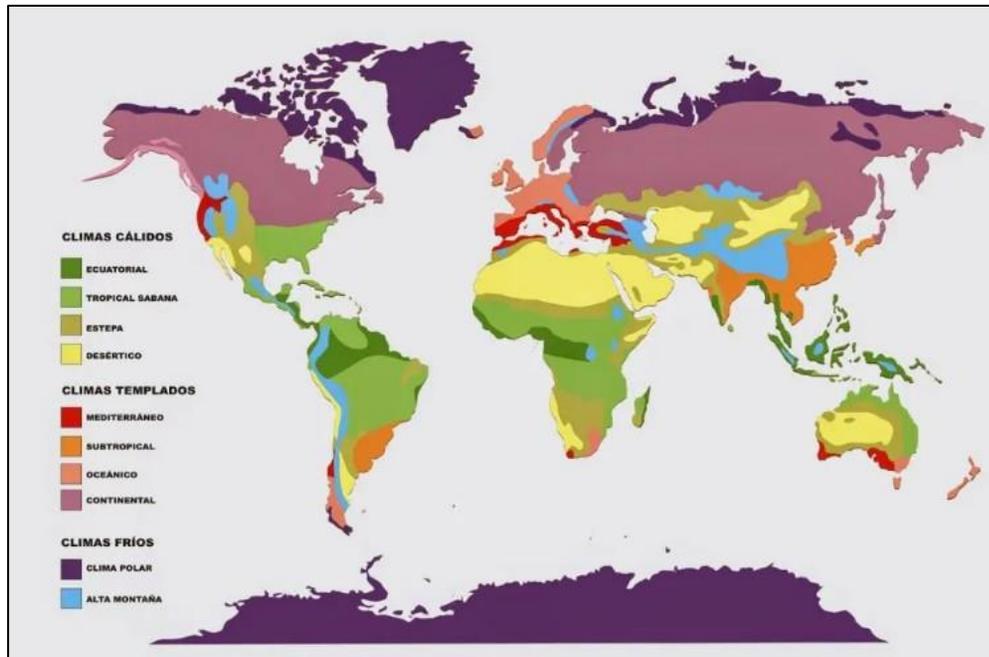
siguiendo criterios climáticos en la medida de lo posible en base a las regiones Köppen²³. La asociación de regiones que se ha hecho es la siguiente:

El clima de Rusia está caracterizado según las zonas climáticas Köppen como un clima templado – continental con zonas de clima frío – polar. Pese a que no existe en Europa el clima polar, sí se puede caracterizar el templado – continental con países como Estonia. El clima de China es predominantemente cálido, por lo que se aproxima utilizando una región de clima templado con una temperatura media alta, como es España. Siguiendo este criterio también se utiliza España para extrapolar con LROW. Como puede verse en la Figura 35 el conjunto USMCA comprende varios climas: zonas templadas como Canadá (cuya temperatura media anual es de 6.5°C), y también más cálidas como México y Estados Unidos, cuya temperatura media anual es de 12.5°C. Se ha asimilado este conjunto con Alemania cuya temperatura media anual es de 9°C, un punto intermedio entre tanta diversidad. Para el este de Asia y Oceanía se ha utilizado España nuevamente por ser Australia una región cuya temperatura media anual es similar a la española (aproximadamente 21°C frente a 18°C en España). En la Figura 35 se muestra el mapa de regiones Köppen en el que se basa este criterio.

Por otra parte, en el estudio (Forzieri et al., 2018) se calculan daños para las infraestructuras críticas que superan un determinado nivel de vulnerabilidad, que se determina a partir de encuestas²⁴ a expertos. Si el nivel de vulnerabilidad más votado para una determinada infraestructura resulta ser “bajo”, entonces no se estima ningún daño para ese sector. Esta metodología puede introducir cierto sesgo en las estimaciones pero podría mitigar su efecto usando medidas de extrapolación.

²³Las regiones Köppen son un sistema de clasificación climática mundial en los que se identifican cinco climas principales que se subdividen en clases según el comportamiento de la temperatura y las precipitaciones en cada área geográfica.

²⁴En las encuestas realizadas en (Forzieri et al., 2018) se pide a un grupo de expertos que vote si el nivel de vulnerabilidad de una determinada infraestructura hacia un determinado evento es “ningún daño, vulnerabilidad baja, moderada o muy alta”. En ocasiones a pesar de que la suma de los votos de moderada y muy alta supera al resto, se escoge baja o nula por ser la más votada. Incluso, en ocasiones, la diferencia es de un voto.

Figura 35*Regiones Köppen.*

Fuente: (Germán Portillo, s. f.)

En el marco del proyecto LOCOMOTION se ha ideado, además de lo ya explicado, una estrategia de extrapolación sectorial a través de una “matriz de vulnerabilidad” para considerar también el daño sobre el resto de infraestructuras que no se han incluido originalmente en el estudio (Forzieri et al., 2018). Esta matriz establece un sistema graduado basado en la literatura en el que cada infraestructura posee un nivel de vulnerabilidad representado por un color, de esta forma, dos infraestructuras que tengan el mismo color pueden ser extrapolables si cumplen una serie de condiciones.

- Se asume que una misma infraestructura se comporta igual frente a cada familia de eventos (agua, calor, viento).
- Si solo se tienen datos sobre una infraestructura con un nivel de daño superior no se extrapola a los de vulnerabilidad inferior.

Las matrices de vulnerabilidad se muestran en el Anexo B, solo se ha incluido las correspondientes a los eventos de calor ya que son los únicos cuyas funciones se van a probar dentro del modelo. Cada color representa un orden de magnitud, siendo el color más oscuro el de mayor vulnerabilidad y desciende hasta llegar a los colores más claros. Estas matrices no han sido desarrolladas en el ámbito de este trabajo fin de grado, simplemente se han utilizado.

2.4. Modelado de Impactos sobre la Economía.

2.4.1. *Qué es la Dinámica de Sistemas*

La dinámica de sistemas es una herramienta de modelado con una metodología basada en la interrelación de variables a partir de la cual se puede estructurar cualquier conocimiento cualitativo sobre un proceso o sistema. La génesis del modelo puede ser un mapa mental del proceso en el que se identifican todas las variables que participan y la relación entre estas. Tras la definición del modelo se emplean softwares en los que se programan las ecuaciones que ligan las variables y se introducen los datos necesarios para la simulación y la extracción de resultados cuantitativos. De esta forma, gracias al empleo de softwares específicos como herramienta de cálculo junto con la definición de un Diagrama Causal²⁶ se puede generar una simulación del proceso y analizar sus tendencias (Martín García & Sterman, 2014).

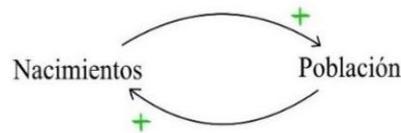
Existen ciertas reglas para la generación de diagramas causales siguiendo la teoría de dinámica de sistemas. A continuación, se va a explicar la metodología básica para la generación de un modelo con un ejemplo típico en el que se pretende relacionar las variables “Población”, “Nacimientos” y “Defunciones”.

²⁶ Un diagrama causal es un esquema con las influencias entre las variables claves del sistema.

Como ya se ha indicado, lo primero es encontrar las relaciones más básicas, representadas con flechas que indican la interacción directa entre dos variables. En ocasiones, estas relaciones pueden ser intuitivas, como ocurre en la Figura 36.

Figura 36

Bucle positivo en dinámica de sistemas.



Fuente: Elaboración propia.

El sentido de la flecha establece la relación causa-efecto entre las dos variables de tal forma que nace en la “causa” y desemboca en el “efecto”. En el ejemplo de la Figura 36, debido a que hay más nacimientos, aumentará la población (flecha superior) pero a su vez, debido a que la población aumenta, los nacimientos también lo harán (flecha inferior). El símbolo de suma que acompaña a las flechas indica que si se produce un incremento en la primera variable, la que se relaciona con ella sufrirá un incremento de igual signo, ambas variables evolucionan en el mismo sentido (si disminuyen/aumentan los nacimientos, disminuye/aumenta la población).

Por supuesto, dos variables pueden evolucionar en sentidos opuestos (signo negativo). Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 37 entre las variables “Defunciones” y “Población”.

Figura 37

Bucle con realimentación negativa en dinámica de sistemas



Fuente: Elaboración propia.

La flecha que lleva el signo negativo indica que un incremento positivo de las defunciones conllevaría un incremento negativo de la variable población.

Del mismo modo que existen las relaciones directas (las flechas) también se pueden percibir relaciones indirectas (a través de otras variables); si aumentan las defunciones, disminuirán los nacimientos (porque la población disminuye también).

En el Diagrama Causal de la Figura 37 manifiestan dos bucles o retroalimentaciones, uno entre las variables “Nacimientos” y “Población” (positivo) y otro entre las variables “Población” y “Defunciones” (negativo). Un bucle positivo es aquél en el que un incremento de una variable que lo compone trae consigo incrementos en el mismo sentido en toda la estructura del bucle. Este tipo de sistemas tienden a ser inestables. Los bucles negativos, en cambio, tienden a estabilizar el sistema.

Otro tipo de variables comunes son el *flow* y el *stock*. La primera de ellas hace referencia a variables que evolucionan con el tiempo y la segunda es el resultado de la acumulación (la integral en el tiempo) de la primera. También es posible incluir retardos en las variables, lo que se denomina típicamente *delay*, si así se requiriese.

Esta metodología es la que se emplea para el modelado de impactos del apartado 2.4.3. Como ya se ha mencionado anteriormente, la programación en dinámica de sistemas se realiza con el software Vensim que ofrece una interfaz gráfica para relacionar variables, así como algunas funciones propias del entorno como pueden ser condiciones, pulsos, *steps* y otras, útiles para esta tarea.

2.4.2. Características del Modelo Planteado

2.4.2.1. Cadena de Daños Indirectos en el Módulo Económico

El prototipo de módulo económico empleado en el ámbito de este TFG es complejo y engloba relaciones entre muchas variables; en esta sección se explica lo necesario para entender la cadena causal del daño por la cual, si se ve minorado el stock, la producción podría verse igualmente limitada. A continuación, se detalla este proceso de propagación del daño, la Figura 38 puede servir de soporte visual.

Debido a los daños directos que se inyectan en el modelo, el stock de capital se ve minorado en una cierta magnitud. Esta variable, stock de capital, define a su vez la producción máxima que las empresas son capaces de producir a través de un parámetro que determina la productividad del capital:

$$\text{Producción máxima} = \text{stock de capital} \times \text{productividad del capital} \quad (18)$$

La productividad del capital indica cuánta producción se puede conseguir con una unidad de capital. En el modelo se introduce de forma exógena y es una función creciente con el tiempo con pendiente constante.

De esta forma si el stock de capital desciende a un ritmo superior al que crece la productividad, la producción máxima decrece. Siempre y cuando la producción real esté por debajo de la producción máxima, no existirán problemas, pero si la producción es mayor que la producción máxima, sí que se aplica una restricción, limitando así el lado de la oferta.

$$\text{Si Producción}_{\text{real}} < \text{Producción}_{\text{máxima}} \Rightarrow \text{Producción}_{\text{real}} \quad (19)$$

$$\text{Si Producción}_{\text{real}} > \text{Producción}_{\text{máxima}} \Rightarrow \text{Producción}_{\text{máxima}} \quad (20)$$

Por otra parte, en la versión final del módulo, el lado de la demanda también vendrá limitada, en esta ocasión por los precios: si la producción disminuye, las empresas aumentarán los

precios y habrá una parte de la demanda que no pueda acceder a ellos. Con el prototipo de módulo económico del que se dispone para este análisis no se recoge el impacto de los precios en la demanda, pero para garantizar la consistencia y que la demanda no sea mayor que la oferta, se ha limitado también la demanda para que nunca sea superior a la producción máxima.

La pérdida de stock de capital se puede suplir mediante un flujo entrante (positivo), que es la inversión.

$$\text{Inversión} = k \cdot (\text{Stock de capital}_{\text{eq}} - \text{Stock de capital}) + \text{depreciación} \quad (21)$$

Donde el “Stock de capital_{eq}” es el stock de capital de equilibrio que representa el capital que las empresas “desean” obtener en función de su producción real. De esta forma, si la producción real se ve limitada por la producción máxima rápida, debido al daño directo, el stock de capital de equilibrio se verá limitado también.

El parámetro “k” es también exógeno al modelo y define cuánto se puede invertir, es decir, es un número entre cero y uno que limita la inversión año a año (no se ve afectado directamente por el daño).

La depreciación establece la pérdida de valor del stock de capital con un cierto “ritmo”.

Las empresas pueden invertir en vista de que su stock capital se está viendo dañado tanto por la depreciación del capital como por el daño directo de las funciones de daño. Se ha considerado, sin embargo, (en el prototipo de modelo económico) que las empresas conocen el ritmo al que se deprecia su capital y pueden suplirlo y regenerarlo, no así los daños del cambio climático, que son de naturaleza más imprevisible. Por tanto, se asume que las empresas invierten para regenerar su capital depreciado, pero no el dañado por el cambio climático. Aun así, los impactos del cambio climático sí que podrían motivar la inversión a través de otro canal (efecto indirecto): tal y como se ve en la ecuación 21, la inversión depende principalmente de la diferencia

entre el stock de capital real y el stock de capital de equilibrio. Como el stock de capital de equilibrio depende del crecimiento de la producción (si esta no se ve limitada), podría darse la situación de que, si la diferencia entre el stock de capital real y stock de capital de equilibrio es lo suficientemente grande y el ritmo de recuperación de esa inversión es adecuado, la inversión crezca. Esto puede ocurrir con mayor probabilidad en los primeros periodos, cuando el daño directo es menor y la producción máxima no se ve tan minorada como para ejercer una restricción sobre la producción real. Los resultados pueden llegar a ser muy diferentes según la región y el sector, dependiendo de múltiples variables y sus interrelaciones, tales como la productividad del capital, que define a su vez la producción máxima y por tanto el “margen” con el que cuentan las empresas para seguir produciendo o no según el impacto climático recibido.

La transmisión del daño también es intersectorial e interregional, la cadena de daño es la siguiente; si se limita la producción máxima de un sector “A”, a su vez se verán limitados los bienes intermedios que este sector puede aportar al mercado. Es decir, si en vez de producir 15 unidades, produce 10, sólo podrá comercializar con 10 unidades en el mercado de bienes intermedios representado por la matriz *input-output*²⁷. Por esta razón, otro sector “B” que le pudiese demandar este bien para su propio proceso productivo se verá afectado, ya que si necesitaba las 15 unidades solo podrá adquirir las 10 que como máximo ha sido capaz de producir el primero. De esta forma, a través de la escasez de bienes intermedios, se distribuye el daño entre sectores, limitando a su vez la producción real de todos ellos que necesitaban bienes intermedios del sector afectado directamente por el cambio climático.

²⁷La matriz *input-output* o matriz de Leontief establece las relaciones de intercambio entre los sectores y regiones que participan en el mercado. Con esta matriz se refleja que las salidas de unos sectores y regiones son las entradas de otros con los que mantienen relaciones comerciales.

Este daño intersectorial a la producción “rebota” de nuevo en el stock de capital debido a que las empresas calculan la inversión a realizar en base a lo que quieren y esperan producir; es decir, ajustan su producción al crecimiento real que experimentan y como, debido al impacto directo, producen menos, sus expectativas de producir más descienden e invierten menos.

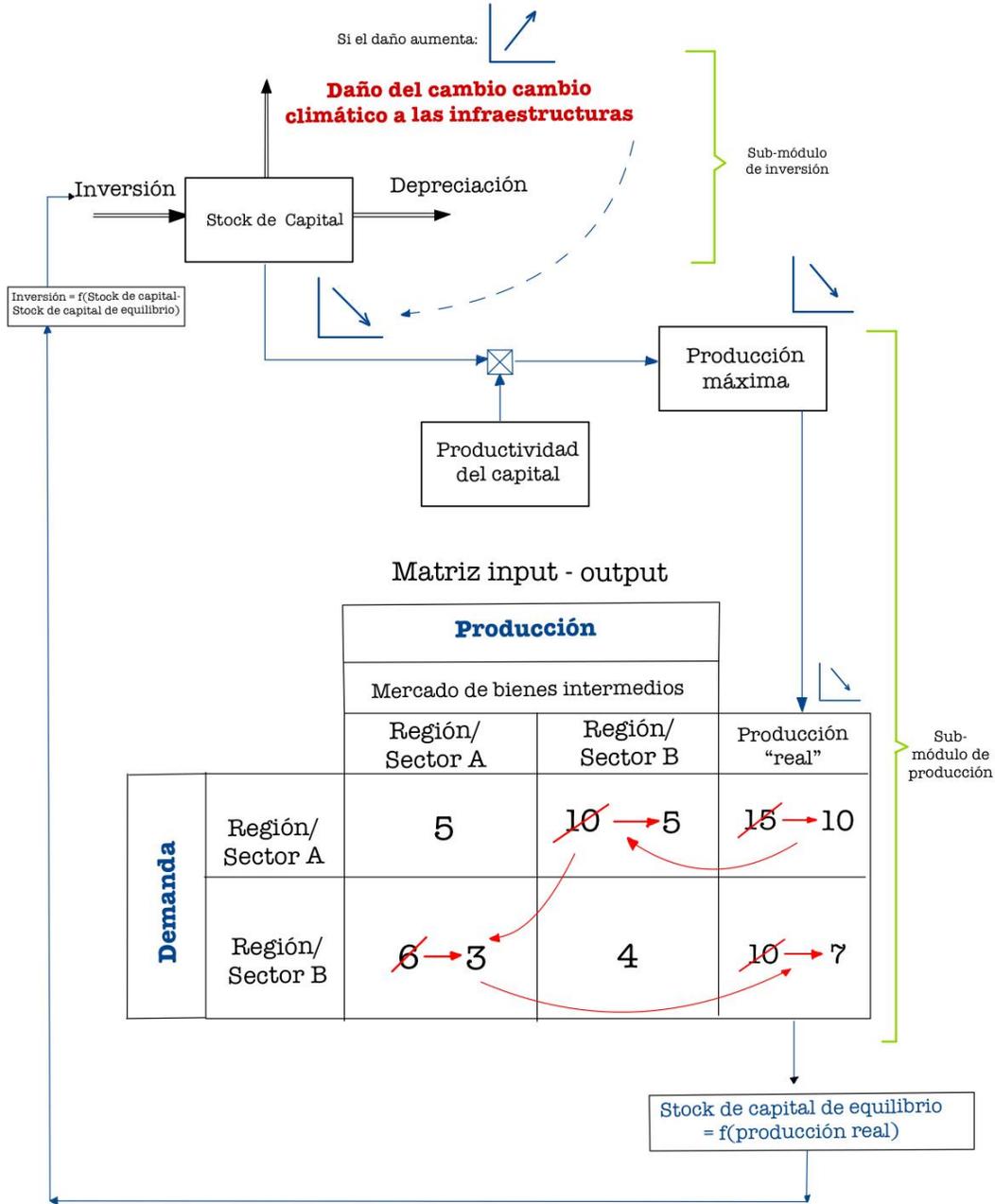
$$\text{Stock de capital}_{eq} = \text{Producción}_{eq} \cdot \text{Productividad del capital} \quad (22)$$

De esta forma se ha podido ver que, si bien el daño directo se restringe a minorar el stock de capital, las relaciones del modelo permiten capturar efectos indirectos en la producción, entre sectores y países y en la inversión, afectando nuevamente al stock de capital. En la Figura 38 se muestra esquemáticamente las relaciones explicadas con un pequeño ejemplo de matriz input-output en el que dos regiones/sectores, A y B, intercambian bienes intermedios.

De lo expuesto anteriormente resulta necesario puntualizar que la detección de toda la cadena causal del daño es complicado debido a la gran cantidad de realimentaciones entre variables y dinámicas no lineales que el modelo contempla. Este hecho es muy común en los modelos de dinámica de sistemas donde es difícil predecir con exactitud cómo va a responder el modelo, de ahí la naturaleza experimental de esta clase de estudios.

Figura 38

Cadena de daños indirectos



Fuente: Elaboración Propia

2.4.3. Modelado del Módulo Climático Simplificado

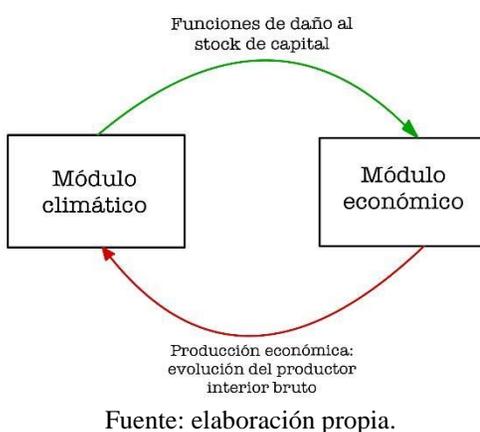
Con el fin de “cerrar el círculo” de relaciones clima – economía, es decir modelar los pasos 1, 2, 3 y 4 de la Figura 5, se va a programar un módulo climático simple pero eficaz calculando el

incremento de temperatura media global en función de la acumulación de CO₂ en la atmósfera. No se modelan otras variables climáticas debido a que el incremento de temperatura es la única variable explicativa que se puede regionalizar con los medios que se tienen, lo cual es estrictamente necesario al realizar un estudio con tan alto nivel de desagregación. Cabe recordar que la relación entre el incremento de temperatura y los fenómenos climáticos extremos, y esta a su vez con la producción económica, ya se encuentra modelada con las funciones de daño, aunque en este trabajo la relación entre fenómenos climáticos extremos y producción es un efecto indirecto que emerge a partir del modelado *bottom-up*²⁸ del daño sobre el capital

Por tanto, las funciones de daño son las realimentaciones que parten del módulo climático y entran en el económico, y el incremento de temperatura media (calculado en base a la producción económica) es la realimentación del módulo económico al climático, precisamente lo que se quiere modelar en esta sección (ver Figura 39)

Figura 39

Realimentaciones entre módulos clima—economía.



²⁸ El sistema se compone por partes pequeñas que se agrupan para formar un todo. Se modela de lo particular a lo general.

Con la variable PIB global proveniente del sub-módulo de producción se calculan las emisiones de CO₂ asociadas a dicho crecimiento mediante un parámetro que marca la intensidad CO₂/PIB. Esta variable se ha extraído de la fuente (IEA, 2022) para 2015. De esta forma se tiene:

$$\text{Emisiones CO}_2(t) = \text{PIB}(t) \cdot \text{Intensidad} \quad (23)$$

Siendo la intensidad 0.4 Kg CO₂/\$2015.

Las emisiones de CO₂ se acumulan en un stock (“cumulative CO2 emissions”) y en base a dicho almacenamiento, que parte de un valor inicial para 2015 extraído del modelo MEDEAS²⁹, se calcula el incremento de temperatura media global mediante un parámetro denominado TCRE (*Transient Climate Response to Cumulative Emissions of CO₂*). El valor inicial del stock de emisiones de CO₂ calculado por el IAM ha resultado ser de 2028e12 KgCO₂.

$$\text{Stock de Emisiones (t)} = \text{Emisiones de CO}_2(t) + \text{Stock inicial de CO}_2 \quad (24)$$

$$\Delta\text{GMST}(t) = \text{Stock de Emisiones (t)} \cdot \text{TCRE} \quad (25)$$

❖ **Significado físico del parámetro TCRE.** Recientemente se ha demostrado que el calentamiento global crece de forma proporcional a las emisiones acumuladas de CO₂ en la atmósfera y, además, se sabe que la temperatura aumenta casi instantáneamente y no con un cierto retraso temporal, como se pensaba anteriormente (Dietz & Venmans, 2019).

En base a lo anterior se ha calculado este parámetro TCRE como el producto de dos funciones:

$$\text{TCRE} = \frac{\Delta\text{Temperatura}}{\Delta\text{Emisiones CO}_2} \cdot \frac{\Delta\text{Emisiones CO}_2}{\Delta\text{Emisiones Acumuladas CO}_2} \quad (26)$$

El primer factor no es una simple constante como se podría pensar. Esto es debido a que, al introducir un pulso de emisiones en la atmósfera, aunque esta pudiese calentarse rápidamente y llegar a un valor estacionario en poco tiempo, la inercia de los océanos provoca una respuesta

²⁹Modelo IAM implementado entre 2016 y 2019, de carácter modular, con alta resolución sectorial y regional, utilizado para la detección de parámetros físicos clave para la transición económica baja en carbono (MEDEAS, 2022)

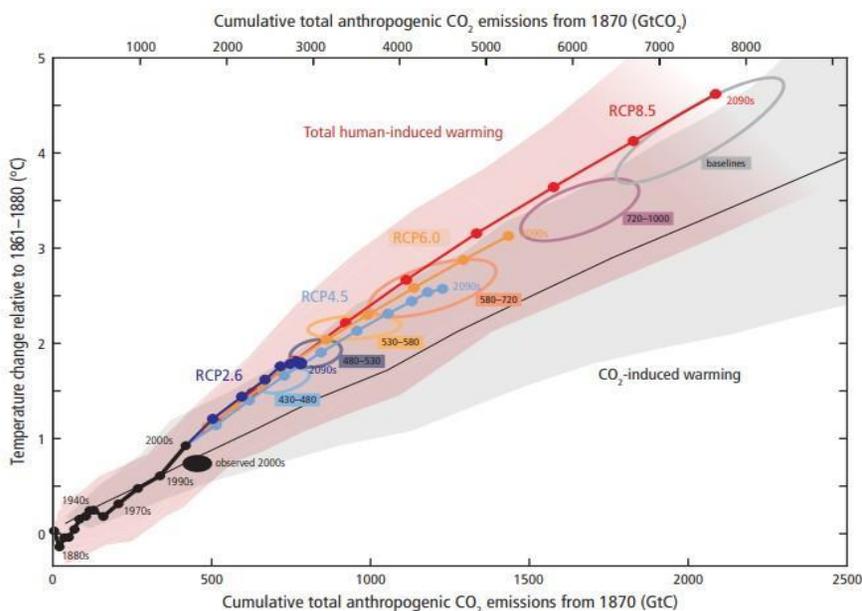
sobre-amortiguada. Las masas de agua responden como una gran batería e introducen su dinámica en la respuesta.

El segundo factor tampoco es una constante debido también a la acción de los océanos; las masas de agua absorben el CO₂ acumulado produciendo que este factor siga una evolución cuadrática decreciente.

Curiosamente estas dos dinámicas, al multiplicarse se anulan y se obtiene como resultado una constante, TCRE, demostrando de este modo que la temperatura crece linealmente con las emisiones acumuladas.

Figura 40

Parámetro TCRE (pendiente de la recta)



Fuente:(IPCC, 2014)

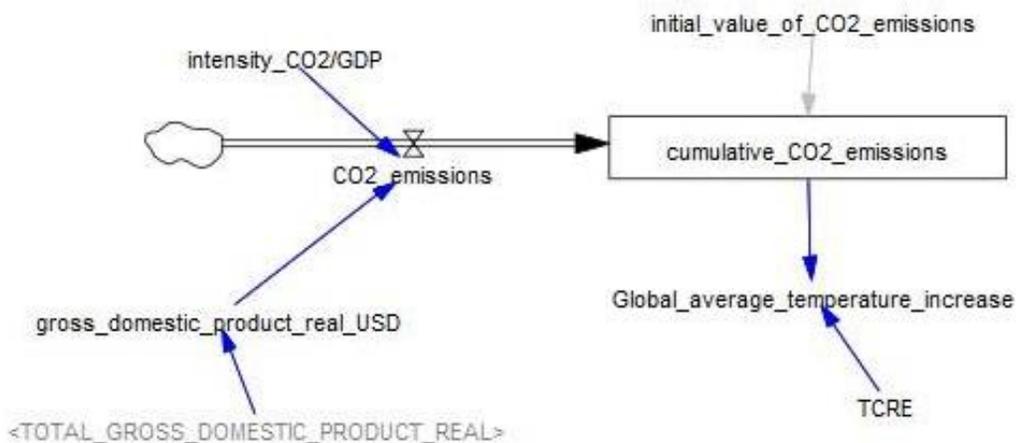
Cabe destacar la labor de los IAMs en este aspecto; gracias a ellos se ha podido determinar este parámetro y comprender mejor la relación “emisiones acumuladas de CO₂ -- incremento de temperatura”.

Aunque el módulo climático resulte ser una versión muy simplificada con pocos indicadores climáticos, lo cierto es que sus relaciones son suficientemente representativas para modelar el incremento de temperatura media global (Dietz & Venmans, 2019), ya que se ha demostrado que, efectivamente, existen relaciones lineales sencillas entre el incremento de emisiones acumuladas y el incremento de temperatura. El valor, por tanto, del parámetro TCRE se ha obtenido del cálculo de la pendiente de la recta roja de la Figura 40 aunque en todos los casos es parecido, resultando ser de $5.8333e-16$ °C/KgCO₂.

En la Figura 41 se muestra la programación del modelo climático en Vensim habiendo integrado las ecuaciones y los parámetros anteriormente mencionados.

Figura 41

Módulo climático en Vensim.



Fuente: elaboración propia a través del software Vensim.

En base al crecimiento del PIB global calculado por el módulo económico y al valor dado a las constantes explicadas, se ha observado que la temperatura aumenta en lo que se correspondería aproximadamente con un escenario SSP2-4.5 relativo a un nivel de emisiones intermedio.

2.4.4. Integración de las Funciones de Daño en el Modelo

Una vez calculadas las funciones de daño al stock de capital se comprueba su funcionamiento dentro del modelo para lo que es necesario generar la estructura de las funciones en Vensim: esto es lo que se ha denominado módulo de impactos.

El incremento de temperatura (variable independiente) que se introduce en las funciones se puede generar por dos vías:

- De forma endógena al modelo haciendo uso del módulo climático que solo contabiliza la concentración de dióxido de carbono y no otra clase de GEI.
- De forma exógena al modelo, a partir de escenarios SSPs (concretamente el escenario SSP5-RCP8.5) que tiene en cuenta la emisión de diversas clases de GEI además de CO₂, por lo que procura un mejor entendimiento del daño a elevadas temperaturas (esta variable se corresponde con el “área 2” de la Figura 42).

A continuación, se explica con detalle el proceso seguido para el modelado usando como soporte visual la Figura 42 que se encuentra distribuida en distintas zonas numeradas para facilitar el seguimiento de la exposición.

Los parámetros de las funciones de daño para los cinco eventos de estudio se han calculado con el algoritmo generado en MATLAB y se han almacenado en distintos ficheros con formato EXCEL. Después de un proceso de reordenación de las matrices de datos para que cuadren con el orden de lectura del modelo en Vensim, se generan tres variables “a”, “b” y “c” correspondientes al área 1 de la Figura 42. Para que el lector se haga una idea del gran volumen de información que se maneja, cada parámetro es una matriz de 384 x 62 (3 eventos climáticos x 4 escenarios de incertidumbre x 32 regiones = 384 elementos y 62 sectores) que entra en la función de daño

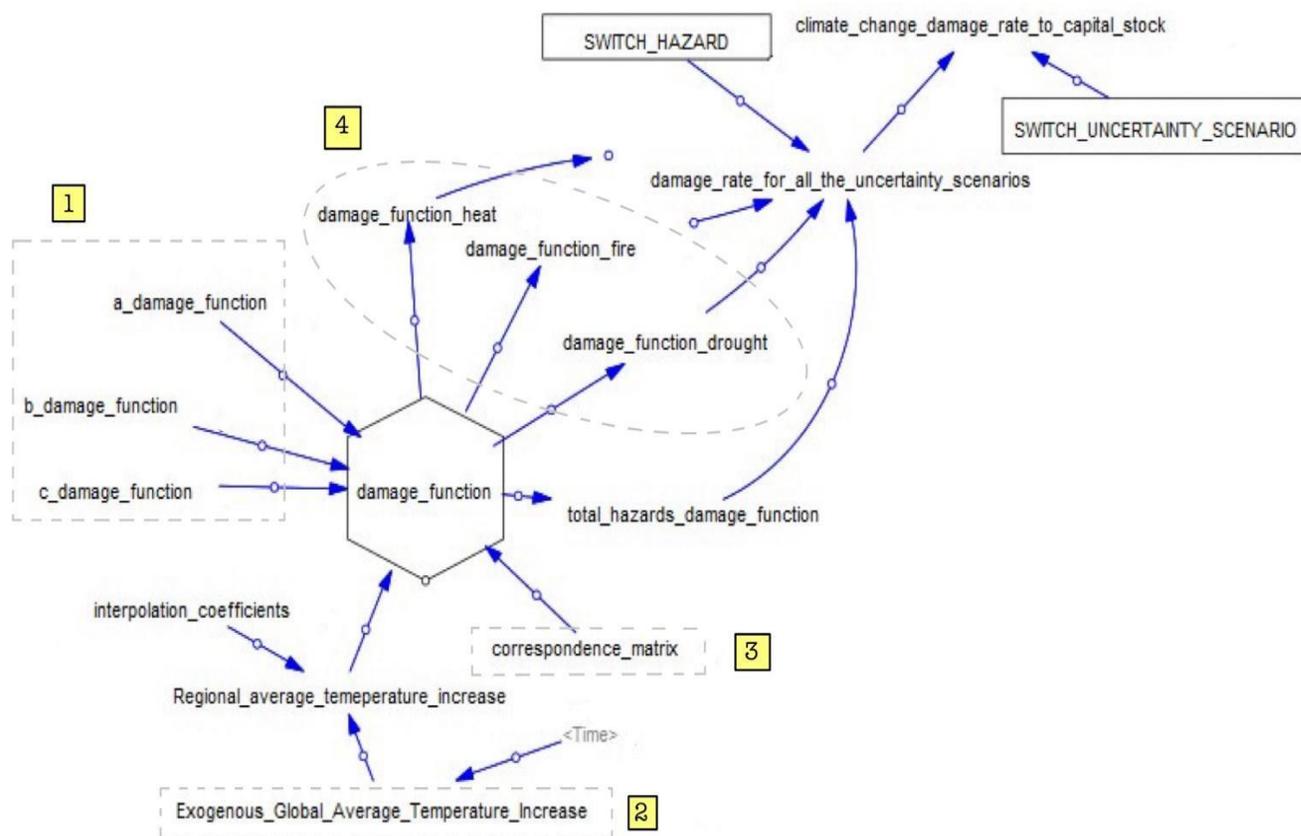
(contorno hexagonal) tal y como indican las flechas azules. Hasta el momento, solo se han introducido los parámetros, pero es necesario generar un sistema que indique al programa con qué forma funcional se corresponde cada conjunto de parámetros a, b y c; para esto se ha creado una “matriz de correspondencia” en el área 3. Esta matriz es una mera estrategia de programación, un extracto de la misma se muestra en el Anexo C.

Del área 2 proviene la variable independiente que se introduce en las funciones de daño. El incremento de temperatura se puede calcular en base al crecimiento económico (círculo clima—economía, aunque solo se tendría en cuenta las emisiones de CO₂ y no la aportación de otros gases de efecto invernadero) o mediante el uso de escenarios SSPs que estiman la temperatura en función del tiempo para distintas trayectorias de emisiones de GEI. El paso de incremento de temperatura global a regional se realiza mediante un vector que guarda los coeficientes de interpolación utilizados en el apartado 2.2.1.

En principio, sólo se han introducido las funciones para los tres eventos de calor, como puede verse en el área 4. Adicionalmente, se han programado unos “interruptores” (*switch*) que permiten seleccionar si se desea aplicar uno o todos los daños directos de los tres eventos y también seleccionar el escenario de incertidumbre con el que realizar la simulación.

Figura 42

Estructura de las funciones de daño en Vensim



Fuente: Elaboración Propia

Capítulo 3. Resultados

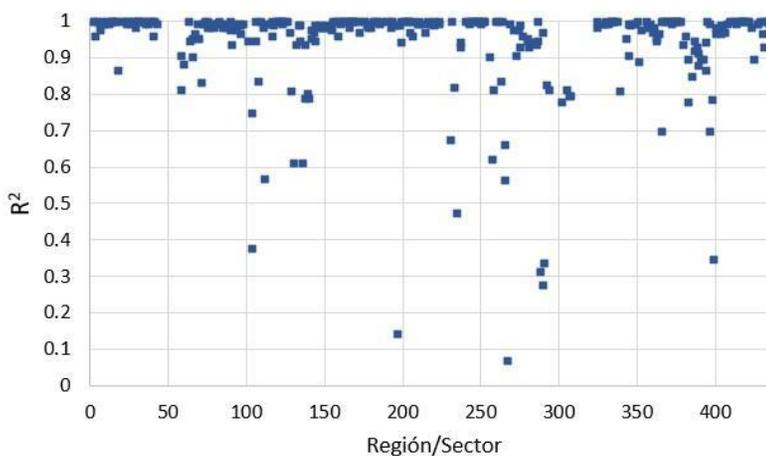
En este capítulo se muestran los resultados obtenidos fruto del proceso metodológico. Debido al gran nivel de desagregación sectorial y regional, al amplio número de eventos climáticos tratados y a la diversidad de escenarios propuestos, los resultados son abundantes (se han estimado aproximadamente 6000 funciones de daño entre todos los eventos y escenarios) y no es posible mostrarlos todos. Por esta razón, en cada apartado se exhiben aquellos considerados de mayor interés o más representativos; como norma general se presta especial atención a los fenómenos de calor por ser los que con certeza causarán más daño en el futuro.

3.1. Resultados de las Regresiones

3.1.1. Bondad del ajuste de las regresiones

Se ha evaluado la bondad del ajuste de las funciones de daño estimadas mediante el estadístico R^2 . En las siguientes figuras se representa su valor para todas los conjuntos región/sector por cada fenómeno climático extremo, para el escenario de promedios, aunque el comportamiento es parecido en todos los escenarios de incertidumbre. Se comienza por la Figura 43, relativo al evento climático sequías y seguidamente se exponen las figuras para el resto de los eventos.

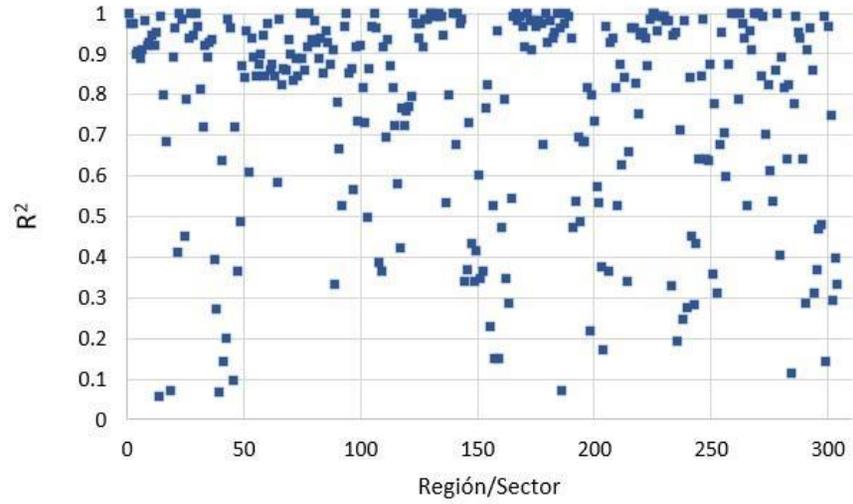
Figura 43
Estadístico R^2 para sequías



Nota: en el eje "x" se representa el conjunto "región y sector".

Figura 44

Estadístico R^2 para inundaciones de interior

**Figura 45**

Estadístico R^2 para las olas de calor

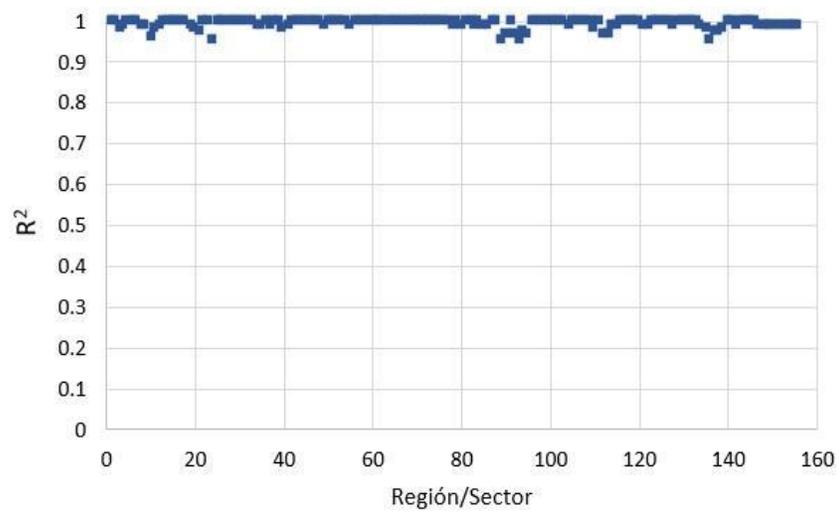
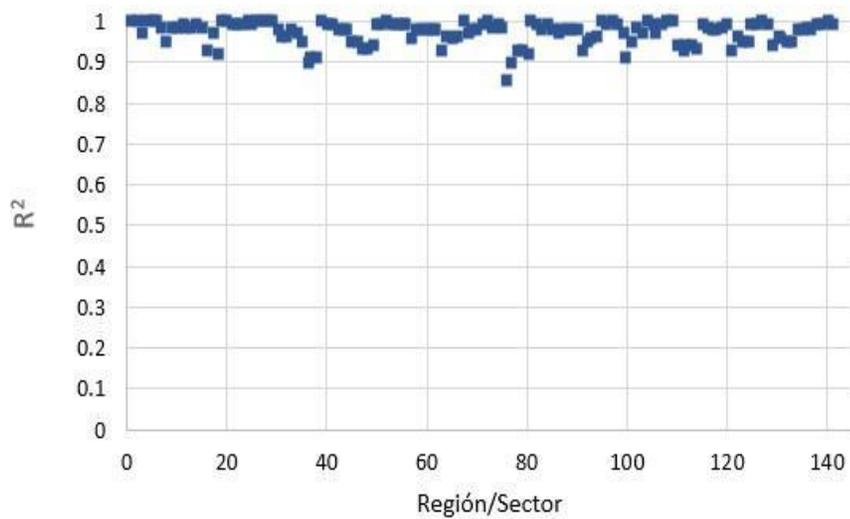
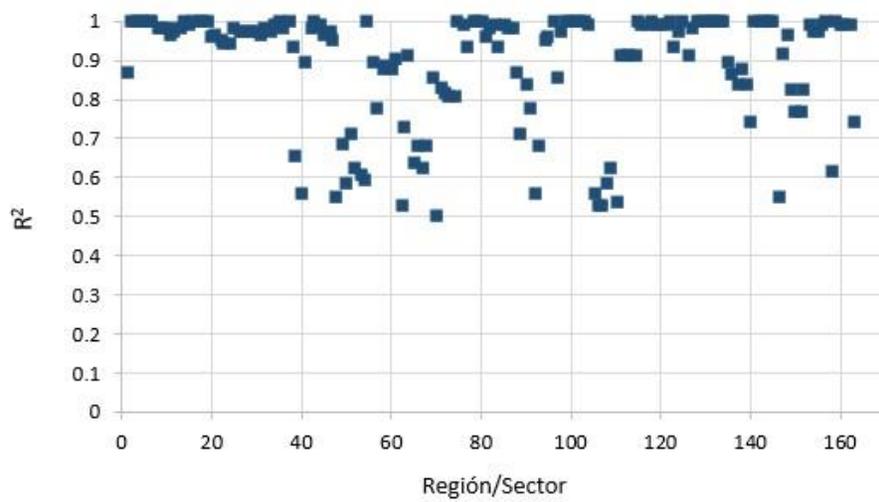


Figura 46

Estadístico R^2 para las olas de frío

**Figura 47**

Estadístico R^2 incendios



En la Tabla 4 se adjuntan los R^2 medios de todas las regresiones por evento y por escenario de incertidumbre.

Tabla 4

Estadístico R^2 medio por evento y escenario de incertidumbre.

| | Sequías | Inundaciones | Olas de Frío | Olas de Calor | Incendios |
|-----------|---------|--------------|--------------|---------------|-----------|
| Máximos | 0.9273 | 0.7622 | 0.9397 | 0.9892 | 0.9000 |
| Mínimos | 0.8770 | 0.7636 | 0.9872 | 0.9264 | 0.8219 |
| Promedios | 0.9432 | 0.7658 | 0.9740 | 0.9935 | 0.8941 |
| Mediana | 0.9370 | 0.7970 | 0.9144 | 0.9703 | 0.9198 |

3.1.2. Formas Funcionales de Daño por Evento y Sector

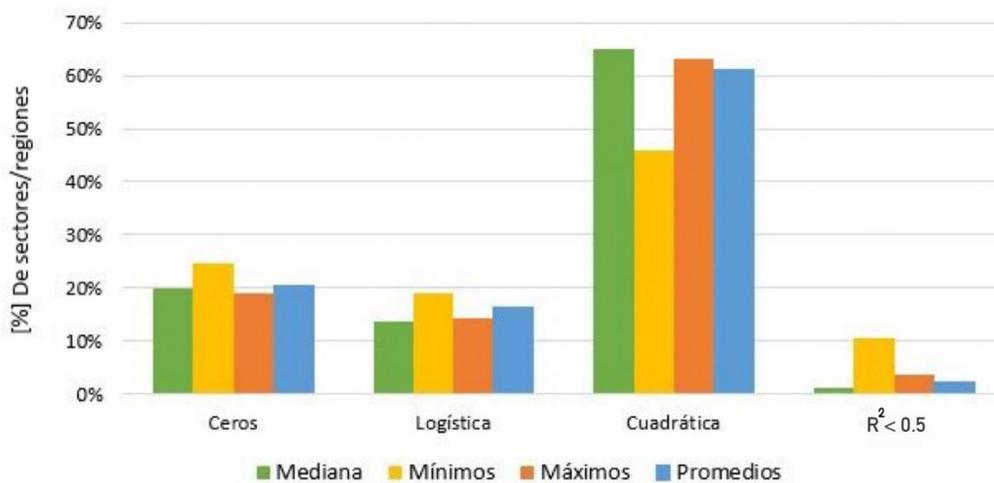
3.1.2.1. Formas Funcionales de Daño para cada Evento Climático

Relativo a las sequías, si se estudia de forma agregada el impacto potencial sobre las infraestructuras críticas consideradas en Forzieri et al. (2018) se observa que el daño en Europa asociado al incremento de temperatura media global representa menos del 1% de daño directo sobre el stock de capital europeo para incrementos de GMST de 3°C.

Si se analizan las dinámicas internas del daño a través de los resultados de las regresiones para las sequías en Europa se obtiene la Figura 48 . En ella se ha denominado “Ceros” a los países/sectores para los cuales los modelos climáticos no han pronosticado ningún daño potencial ante el evento en cuestión, posiblemente porque el evento tenga escasas probabilidades de producirse en la región en la que se encuentra ubicado dicho sector.

Figura 48

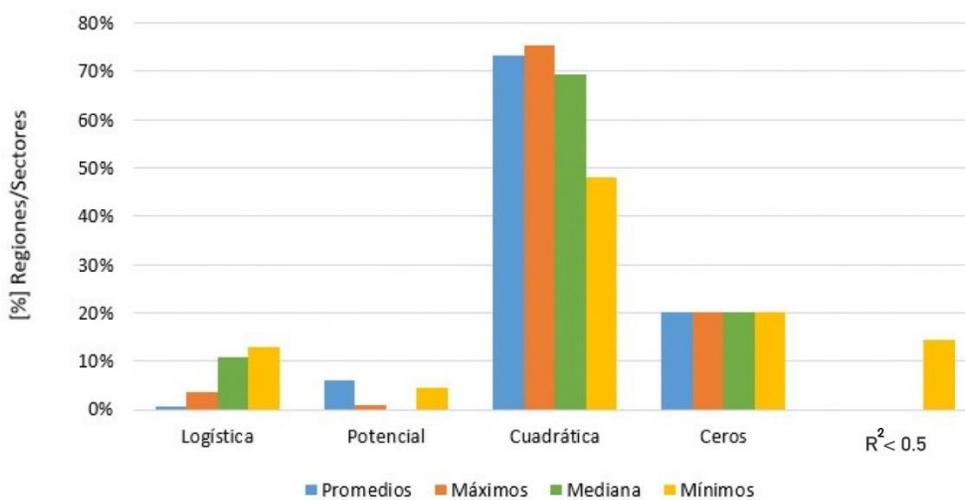
Formas funcionales que mejor ajustan para el evento sequías.



En la Figura 49 se muestran las dinámicas de daño directo para las olas de calor en todos los escenarios.

Figura 49

Formas funcionales que mejor ajustan para el evento olas de calor



3.1.2.2. Formas Funcionales de Daño para cada Sector

Debido a que las sequías es un evento con gran contribución al daño y del que se tienen un elevado número de datos, se va a mostrar con detalle su afectación a los distintos sectores bajo los escenarios máximos (Figura 50) y promedios (Figura 51), distribuciones parecidas ocurren en el escenario de mínimos y de máximos.

Figura 50

Formas funcionales sectoriales asociadas a sequías, máximos

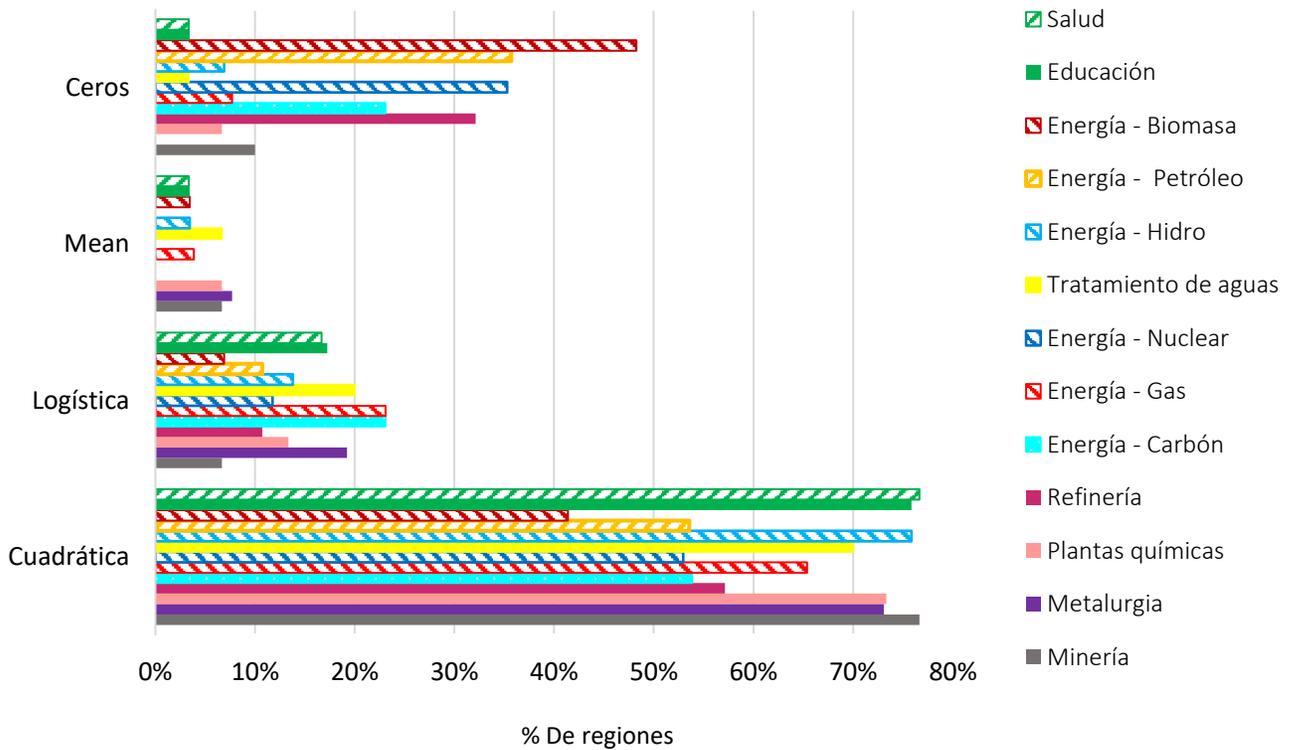
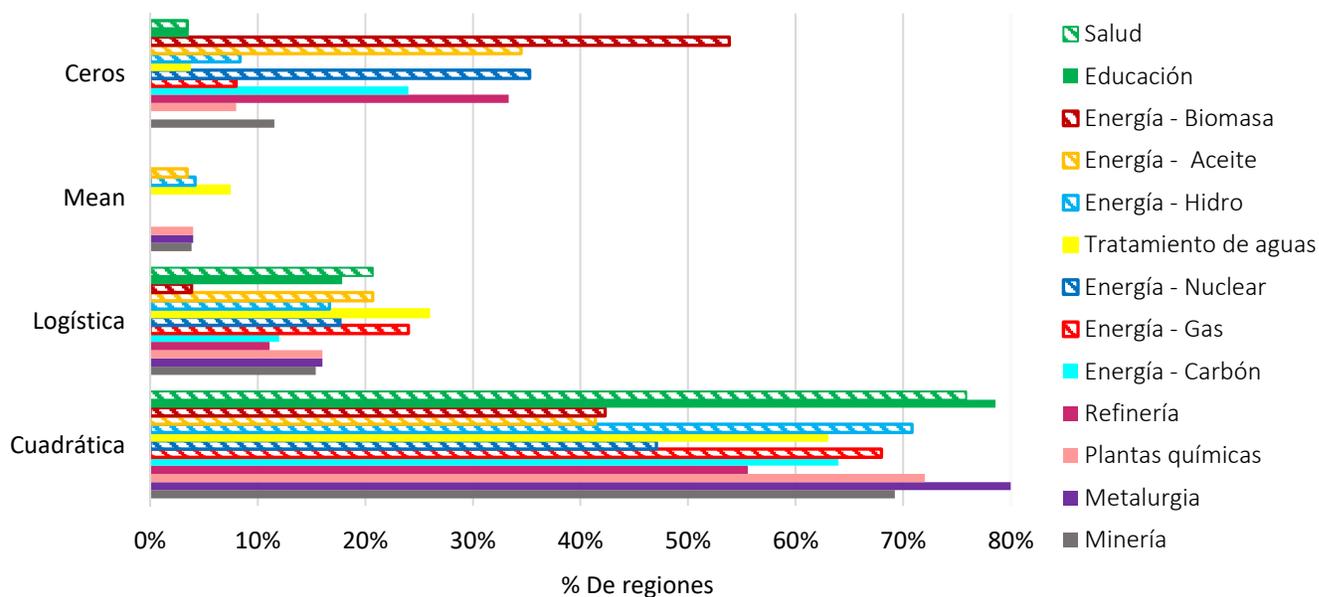


Figura 51

Formas funcionales sectoriales asociadas a sequías, promedios



3.1.2.3. Formas Funcionales de Daño para el Sector/Región más Vulnerable.

En esta sección se exponen las dinámicas de daño directo para el país más vulnerable (identificado por recibir los daños más elevados) para cada sector.

❖ Sector minero: España

Para el sector minero se ha destacado España como región con mayor daño potencial por efecto de las sequías. En la Tabla 5 se recogen los resultados de sus regresiones.

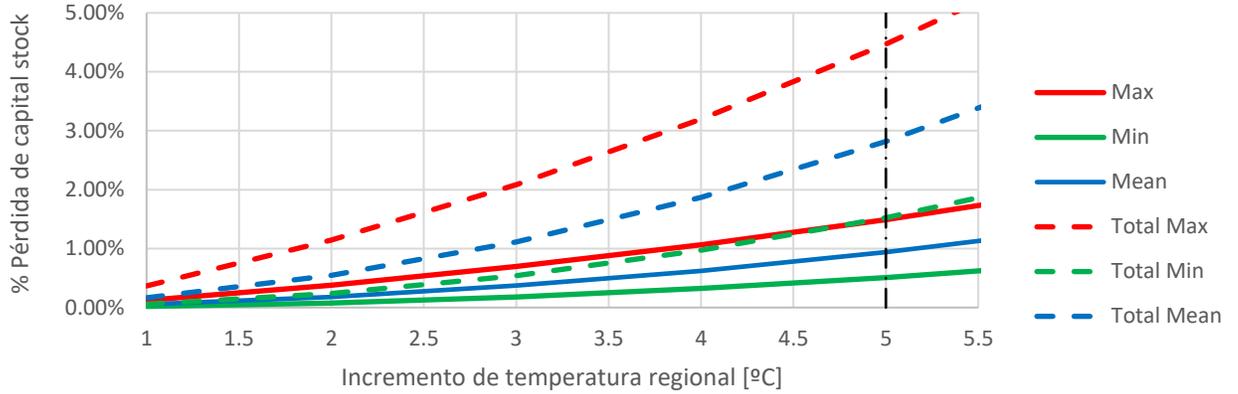
Tabla 5

Resultado de las regresiones para España, sector minero.

| Evento climático | Región | Sector | Escenario de incertidumbre | Forma funcional | R ² |
|------------------|--------|---------|----------------------------|-----------------|----------------|
| Sequías | España | Minería | Máximos | Polinómica | 0,99959 |
| Sequías | España | Minería | Mínimos | Polinómica | 0,98615 |
| Sequías | España | Minería | Promedio | Polinómica | 0,99935 |
| Sequías | España | Minería | Mediana | Logística | 0,99184 |

Figura 52

Suma del daño al sector minero español



- Sector Metalúrgico: Eslovenia

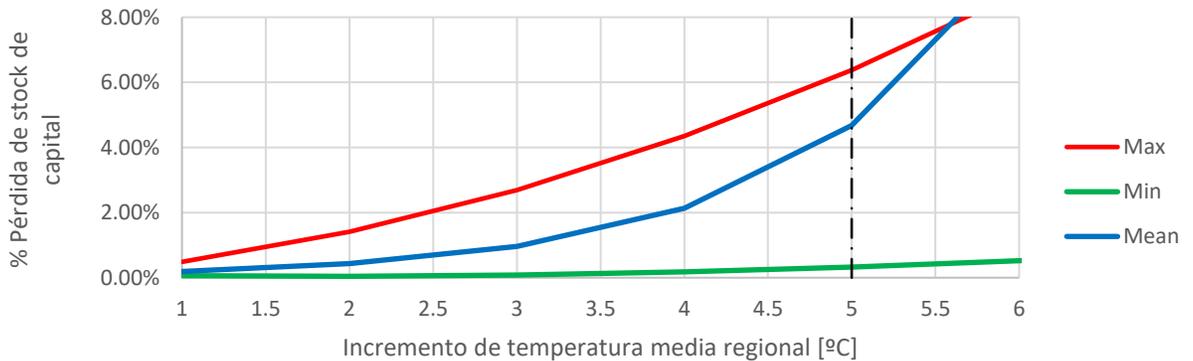
Tabla 6

Resultado de las regresiones para Eslovenia, sector metalúrgico.

| Evento climático | Región | Sector | Escenario de incertidumbre | Forma funcional | R ² |
|------------------|-----------|-------------|----------------------------|-----------------|----------------|
| Sequías | Eslovenia | Metalúrgico | Máximos | Polinómica | 0,99243 |
| Sequías | Eslovenia | Metalúrgico | Mínimos | Polinómica | 0,89328 |
| Sequías | Eslovenia | Metalúrgico | Promedio | Logística | 0,99737 |
| Sequías | Eslovenia | Metalúrgico | Mediana | Logística | 0,99132 |

Figura 53

Daño directo de las sequías al sector metalúrgico de Eslovenia



- Sector Químico: Grecia

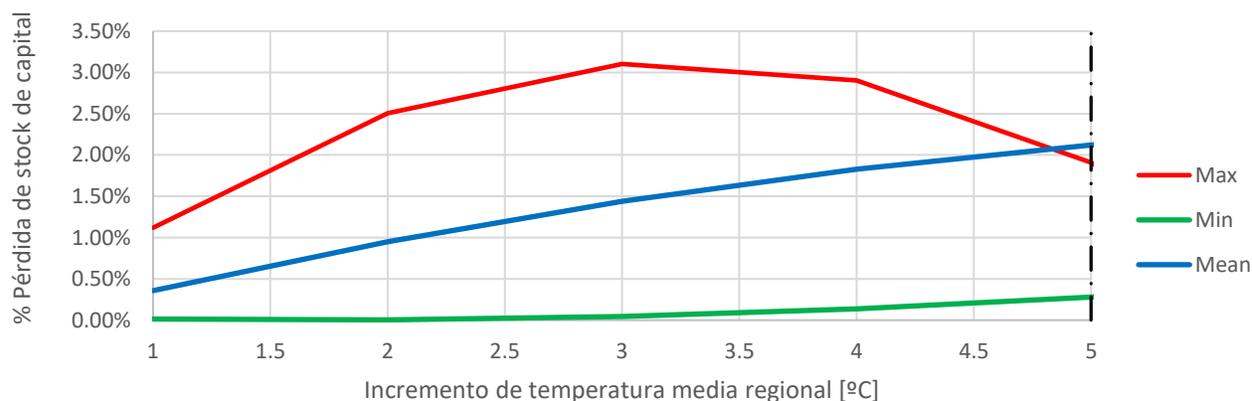
Tabla 7

Resultado de las regresiones para Grecia, sector químico.

| Evento climático | Región | Sector | Escenario de incertidumbre | Forma funcional | R ² |
|------------------|--------|---------|----------------------------|-----------------|----------------|
| Sequías | Grecia | Químico | Máximos | Polinómica | 0.97661 |
| Sequías | Grecia | Químico | Mínimos | Polinómica | 0.97732 |
| Sequías | Grecia | Químico | Promedio | Polinómica | 1 |
| Sequías | Grecia | Químico | Mediana | Polinómica | 0.92732 |

Figura 54

Daño directo de las sequías al sector químico de Grecia



- Sector Tratamiento de Aguas: Eslovenia

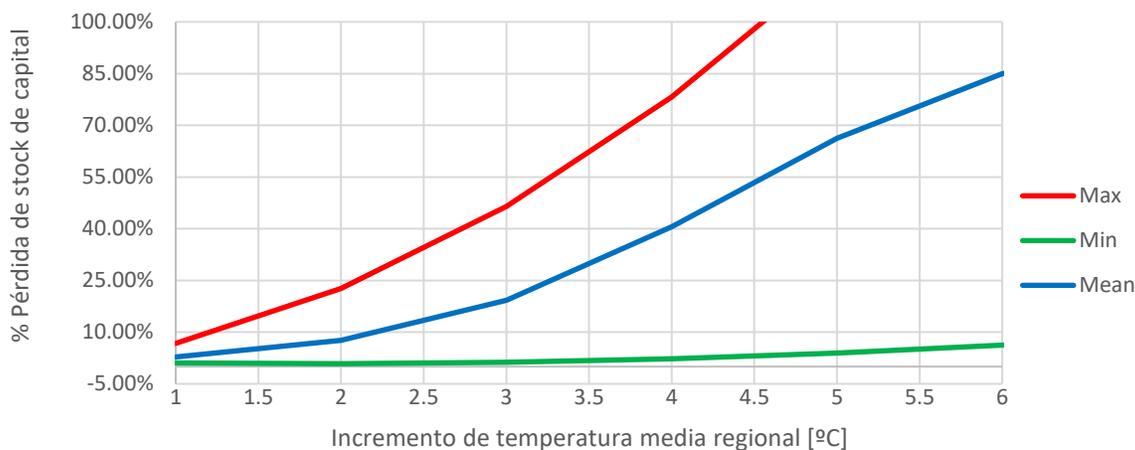
Tabla 8

Resultado de las regresiones para Eslovenia, sector de tratamiento de aguas.

| Evento climático | Región | Sector | Escenario de incertidumbre | Forma funcional | R ² |
|------------------|-----------|-------------|----------------------------|-----------------|----------------|
| Sequías | Eslovenia | Trat. aguas | Máximos | Polinómica | 0.99971 |
| Sequías | Eslovenia | Trat. aguas | Mínimos | Polinómica | 0.59853 |
| Sequías | Eslovenia | Trat. aguas | Promedio | Logística | 0.99936 |
| Sequías | Eslovenia | Trat. aguas | Mediana | Logística | 0,98864 |

Figura 55

Daño directo de las sequías al sector de tratamiento de aguas de Eslovenia



❖ Sector energético. El sector energético comprende las plantas de gas, biomasa, petróleo, nucleares e hidroeléctricas con las que se produce energía. En la Tabla 9 se muestran los resultados generales de las regresiones para este sector en España.

Tabla 9

Resultado de las regresiones para el sector energético de España.

| Evento climático | Región | Sector | Escenario de incertidumbre | Forma funcional | R ² |
|------------------|--------|---------|----------------------------|-----------------|----------------|
| Sequías | España | Energía | Máximos | Polinómicas | >0.96 |
| Sequías | España | Energía | Mínimos | *Nota | - |
| Sequías | España | Energía | Promedio | Polinómicas | >0.95 |
| Sequías | España | Energía | Mediana | Polinómicas | >0.96 |

*Nota. En el escenario de mínimos se ha observado la presencia de dinámicas exponenciales para los sectores de producción energética a partir de energía nuclear y una dinámica de crecimiento potencial para las hidroeléctricas. El estadístico R² se encuentra por encima de 0.9 salvo en el caso de la producción a partir de energía nuclear que es de 0.77.

En las Figuras 56 y 57 se muestran los escenarios de máximos por ser la tendencia más pesimista de daño a la que se podría llegar y que, en consecuencia, acota el daño del resto de escenarios (i.e. en el resto de los escenarios el daño es menor, con las dinámicas descritas en la Tabla 9)

Figura 56

Daño directo de las sequías al sector energético español.

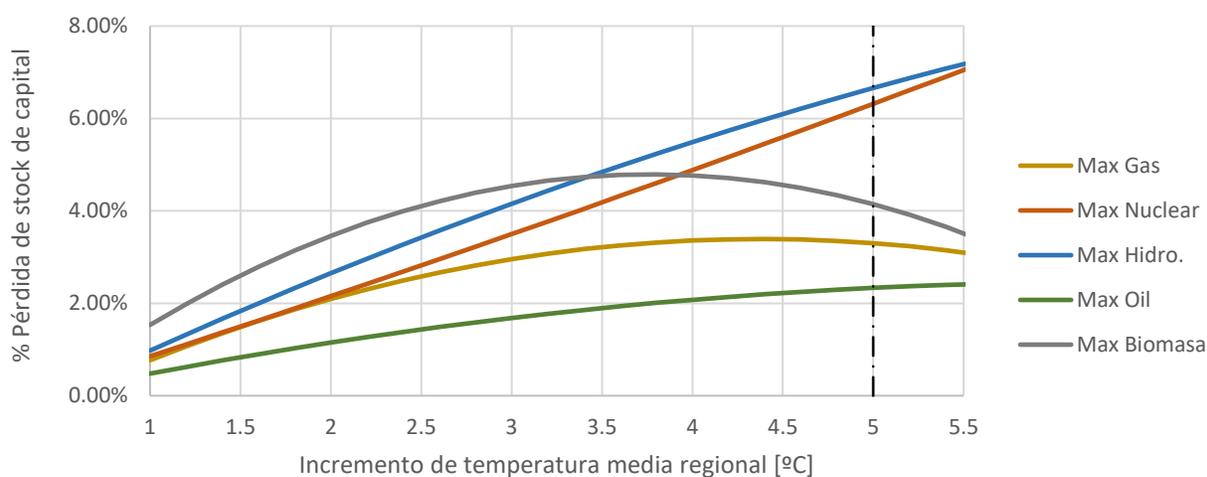
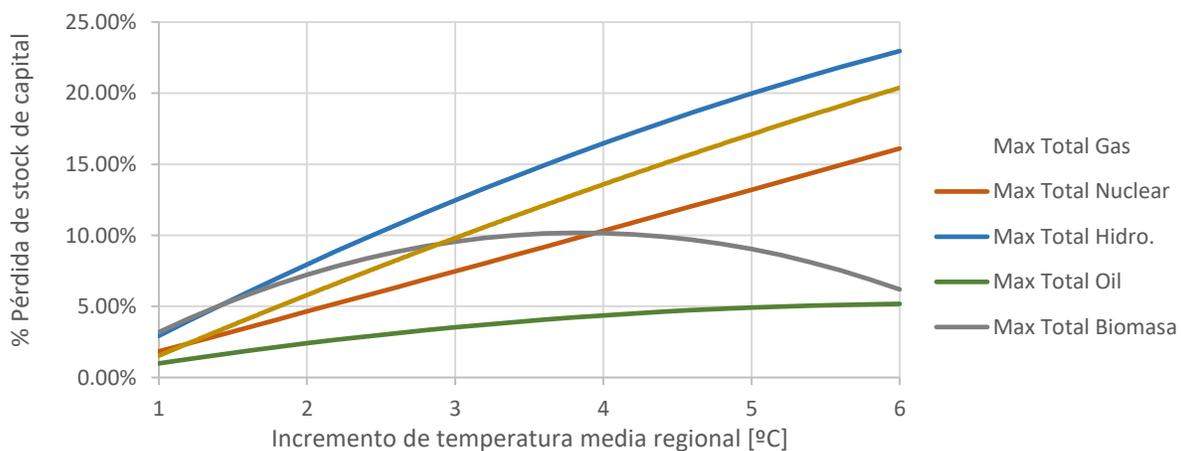


Figura 57

Daño directo de las sequías al sector energético español, varios eventos.



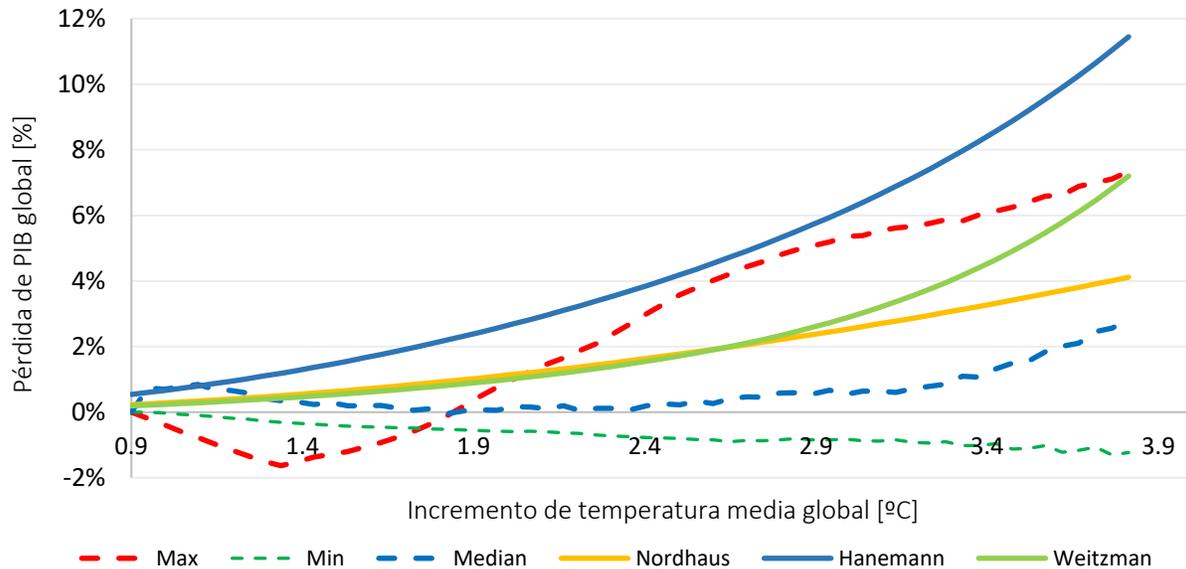
3.2. Resultados de las Simulaciones con el Modelo

En este apartado se muestran los resultados obtenidos al introducir las funciones de daño en el modelo.

En la Figura 58 se muestra la función “ $PIB_{global} = f(\Delta GMST)$ ” contabilizando solo el daño a las infraestructuras críticas (y sin tener en cuenta otra clase de daños físicos) que emerge de la metodología empleada. Se recogen las tres funciones más representativas; máximos, mínimos y mediana y se compara con las funciones expuestas en la sección “1.2.6.1 Funciones de Daño Relevantes en la Literatura.”.

Figura 58

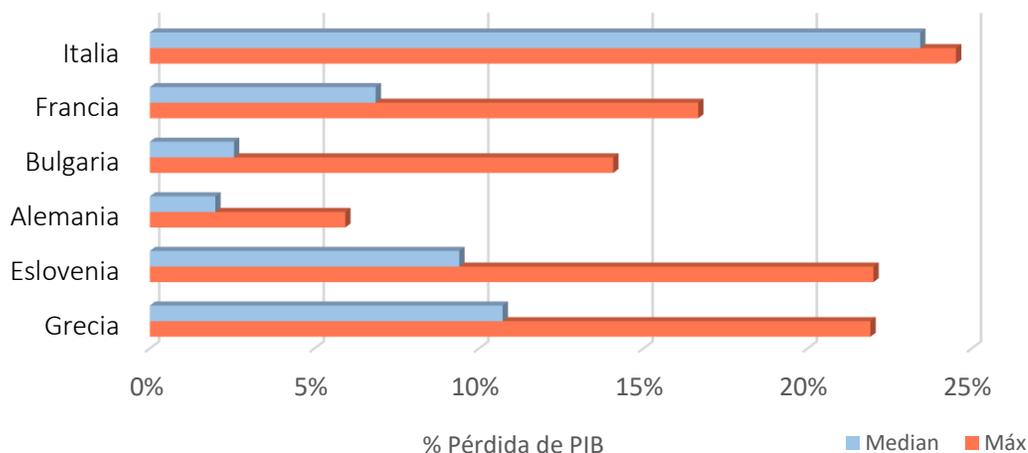
Pérdida de PIB global bajo un escenario SSP5-RCP8.5



En la siguiente figura se muestra la pérdida de PIB que el módulo económico estima para 2075 bajo el mismo escenario SSP5-RCP8.5 en algunas de las economías que más daño presentan. Se ha calculado teniendo en cuenta el peor escenario, donde unos eventos puedan desencadenar en otros.

Figura 59

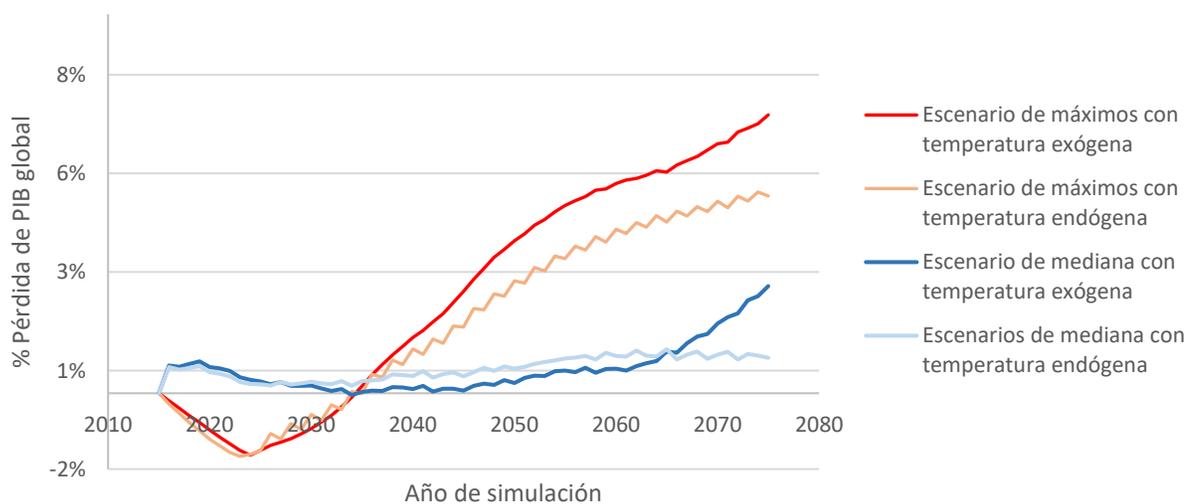
Pérdida de PIB bajo un escenario SSP5-RCP8.5 en 2075.



Por último, se muestra la evolución del daño total estimado en términos de PIB cuando se “cierra el círculo” clima — economía con un escenario de temperatura (generado por la propia evolución de la producción económica endógena al modelo) que se podría asemejar al SSP2-RCP4.5 (emisiones intermedias de GEI).

Figura 60

Pérdida de PIB: temperatura endógena vs. temperatura exógena



Capítulo 4. Discusión de los resultados.

4.1. Análisis de la representatividad de los datos

En esta sección se explican y comentan los resultados obtenidos en el apartado “3.1 Resultados de las Regresiones”.

Con respecto a la Figura 43: pese a que la mayoría de las regresiones se concentran cerca de la banda superior (de 0 a 1), algunos conjuntos sector/región obtienen peores puntuaciones, llegando incluso a estar por debajo del límite de 0.5. Esta representación se obtiene para el escenario de incertidumbre de tendencia central “promedios” (sequías), y el comportamiento observado es similar para el resto de los escenarios con especial notoriedad en el de mínimos. Algo parecido ocurre con las inundaciones de aguas continentales, que resultan ser, incluso, peor representadas por la variable incremento de temperatura (Figura 44) que las sequías. Es evidente la acusada dispersión del estadístico hacia la banda inferior, cercana a 0. El R^2 medio desciende notablemente hasta 0.7658. Al contrario que en los ejemplos anteriores, el resto de los fenómenos se explican ampliamente bien por la temperatura. La Figura 45 representa el estadístico R^2 para las olas de calor y la Figura 46 para las olas de frío y en ambas se observan buenos ajustes, muy cercanos a la banda superior en todos los casos.

El evento climático incendios se encuentra en un punto intermedio entre las sequías y las olas de calor (Figura 47), pues existe cierta dispersión hacia la banda inferior pero este comportamiento no es tan pronunciado.

Por último, y en general, analizando los resultados de todas las regresiones, para todos los eventos y escenarios (Tabla 4) se puede apreciar que el ajuste está por encima de 0.76 siempre. Haciendo uso de métodos visuales, como es la representación gráfica del ajuste, también se han comprobado comportamientos adecuados en las regresiones.

4.2. Sobre las Formas Funcionales del Daño Directo

En este apartado se va a realizar un análisis de las principales tendencias del daño directo en los eventos de calor.

Según el último informe del IPCC los impactos relacionados con las sequías y las olas de calor van a ser especialmente relevantes para 2100 (IPCC, 2021), mientras que las olas de frío presentan una clara tendencia decreciente. En cuanto a las inundaciones; su relevancia va a ser crucial en muchas zonas y para muchos sectores, pero en este estudio no han podido ser caracterizadas al mismo nivel que el resto de los eventos debido a la falta de variables explicativas. En consecuencia, se van a estudiar con más detalle las dinámicas de daño de los eventos de calor y se comentarán observaciones de interés para el resto de los eventos.

Aunque las sequías en Europa supongan un daño directo de menos del 1% (ver 3.1.2.1) del stock de capital para incrementos de temperatura global de 3°C, este dato, sin embargo, otorga una visión muy simplificada del daño que oculta los posibles factores (dinámicas internas a nivel regional y sectorial) desencadenantes de daños indirectos potencialmente superiores. El problema de estudiar de esta forma el daño es que hay países en el norte de EU que acumulan mucho capital y no sufren tanto daño directo de las sequías por tener un clima más frío, por esta razón el daño se diluye.

En la Figura 48 sobre el evento climático sequías, se observa un predominio de las formas funcionales polinómicas (cuadráticas) en todos los escenarios. El escenario de mínimos es el que obtiene una peor representatividad con casi un 11% de regresiones con R^2 menor que 0.5. La dinámica exponencial supera el 10% de los sectores y países de Europa en todos los escenarios. Del mismo modo ocurre con las olas de calor, el daño directo asociado sigue mayoritariamente dinámicas cuadráticas (Figura 49) en todos los escenarios.

4.3. Sobre las Formas Funcionales del Daño Directo por Sector

La vulnerabilidad de un sector se puede estudiar de dos formas; por la magnitud del daño que recibe o por la dinámica de su daño (la presencia de dinámicas exponenciales podría suponer una amenaza fatal para dichos sectores). En esta sección se discuten los resultados del apartado 3.1.2.2 prestando atención a las dinámicas de daño presentes en cada sector ante los eventos de calor relacionados con las sequías y las olas de calor.

Para el evento sequías, la dinámica de daño predominante es la cuadrática para todos los sectores (Figuras 50 y 51). No obstante, casi un 20% de los países siguen tendencias exponenciales en los sectores de salud y educación. La presencia de tendencias exponenciales en el sector energético también es alarmante, superando el 20% en las plantas de gas y carbón y por encima del 10% en las nucleares e hidroeléctricas. El sector de tratamiento de aguas también sigue dinámicas logísticas en aproximadamente un 20% de los países. Aunque se pueda pensar que estas dinámicas son las más pesimistas, la Figura 51 demuestra que se conservan incluso en escenarios de tendencia central (promedios) y del mismo modo se ha observado en el escenario representado por la mediana. La presencia de dinámicas de daño exponencial en escenarios de tendencia central sugiere que la mayoría de los modelos climáticos concuerdan en que los sectores de estos países van a sufrir un daño cuya evolución es muy rápida, aunque puede que la magnitud del daño no lo sea para bajas temperaturas, podría ser una amenaza grave para incrementos elevados. Cabe recordar que los sectores de estudio entran dentro de la categoría de infraestructuras críticas europeas, categorizadas así por su capital importancia para el desarrollo social y económico y por el lugar estratégico que ocupan en las relaciones sectoriales y regionales de Europa. Según la definición que hace (EUR-Lex, s. f.), de la perturbación de estas infraestructuras puede derivar un daño grave que afectaría, por lo menos, a dos países más de Europa.

4.4. Sobre el Daño Directo en el Sector/Región más Vulnerable

En el anterior apartado se han caracterizado los sectores más vulnerables a partir de la detección de dinámicas de crecimiento exponencial en el daño directo que reciben a su stock de capital. En esta sección se identifican las regiones que mayor daño directo reciben (en cuanto a magnitud) en cada sector proveniente de los eventos climáticos de calor.

❖ Sector minero: España

Se ha observado en los datos que España va a ser el país con mayores daños relativos en este sector y que la dinámica de daño predominante para este sector en Europa es polinómica monótona creciente para el rango $[0-5.5]^{\circ}\text{C}$

Los escenarios de máximos, mínimos y promedios de la Figura 52 coinciden en la dinámica polinómica, en cambio la mediana tiene una tendencia logística que rápidamente se dispara (ver Tabla 5).

Debido a que los eventos climáticos se han calculado de forma independiente, el daño potencial anual que podrían causar es aditivo. Es decir, si suponemos un escenario en el que se produjeran olas de calor, sequías e incendios (realista, debido a que a menudo unos desembocan en otros (Forzieri et al., 2018)) y considerando el método de extrapolación planteado en (López Muñoz et al., 2021) se obtendrían los daños de la Figura 52 con líneas discontinuas. La línea negra vertical marca el punto aproximado a partir del cual el daño se extrapola en base a las regresiones realizadas. De este punto en adelante se induce incertidumbre sobre los resultados, no obstante, se ha contemplado este aspecto para la realización de las simulaciones confirmando que el incremento máximo de temperatura no exceda demasiado esta barrera. Se ha observado en los datos que España va a ser el país con mayores daños relativos en este sector y que la dinámica de daño predominante para este sector en Europa es polinómica monótona creciente para el rango $[0-5.5]^{\circ}\text{C}$

- Sector Metalúrgico: Eslovenia

En cuanto al sector metalúrgico, uno de los países que va a experimentar mayor daño directo causado por sequías es Eslovenia. En la Figura 53 se observa que, aunque el escenario de máximos recoge los mayores valores de daño relativo, los modelos climáticos advierten una posible tendencia exponencial del daño en el escenario de tendencia central (promedios-mediana).

Cabe destacar que una hipotética acción conjunta de los eventos de calor sobre este sector/región triplicaría los daños de la Figura 53 pudiendo llegar a perder aproximadamente un 18% de su capital solo por daños directos en el escenario de máximos para el mayor incremento de temperatura considerado. En cuanto a este sector; la mayoría de las regresiones en Europa siguen una forma funcional parabólica, aunque se advierten más casos de tendencias exponenciales y potenciales que en el sector minero.

- ❖ Sector químico: Grecia

Para el sector químico el país que más daños experimenta es Grecia cuyo daño potencial máximo, si solo aconteciesen sequías, sería de un 3% de su capital invertido para un incremento de 3°C. Si se asume la posibilidad de que coexista más de un evento se perdería de un [3-9]% del capital de este sector bajo el escenario de máximos y hasta un 6% de media.

- Sector de tratamiento de aguas: Eslovenia

Este sector presenta, en general, unos daños muy elevados a causa de los eventos de calor en toda Europa. Se observan especialmente pronunciados en Eslovenia.

Las infraestructuras dedicadas al tratamiento de aguas son claves para el bienestar social ya que prestan una labor decisiva para que los recursos hídricos tengan unos niveles adecuados de salubridad y su consumo sea seguro para la salud. Un daño potencial de esta categoría a un sector del que depende la seguridad colectiva conlleva un elevado peligro. Es posible que por esta razón

se estén incentivando actualmente, desde Europa, la investigación sobre las amenazas que presenta este sector debido a eventos climáticos extremos..El sector de tratamiento de aguas es un elemento estratégico que podría afectar tanto al sector de la salud como al sector industrial.

❖ Sector energético: España

Este sector se ve especialmente amenazado, de entre los eventos de calor, por las sequías. En la Figura 56 se puede apreciar que el daño máximo lo reciben las hidroeléctricas; casi un 6% del capital invertido en este sector se verá potencialmente dañado a causa del cambio climático con un incremento de 4.5°C en la temperatura regional.

En la Figura 57 todos los sectores presentan una tendencia polinómica pero no se puede afirmar que su comportamiento sea semejante. Se distinguen, sin embargo, dos grupos cuya dinámica se puede comparar: el daño de las hidroeléctricas y de las nucleares crece más rápido que el del resto de plantas energéticas, tal vez por presentar una vulnerabilidad mayor ante la falta de recursos hídricos.

No obstante, si acontecen varios eventos climáticos (Figura 57) se podría perder desde un 7% hasta un 20% del capital del sector hidroeléctrico en el escenario de máximos. En esta misma figura, donde se han sumado las funciones de daño de las olas de calor y sequías y extrapolado para incendios, se aprecia que la dinámica para las olas de calor cambia, presentando un crecimiento menos amortiguado.

Es importante recordar que estas funciones sólo capturan el daño directo de los eventos. El sector industrial se encuentra íntimamente ligado con el sector energético y es probable que un daño en uno repercuta, dentro del módulo económico, gravemente en el otro, recogiendo un daño total a estos sectores potencialmente superior. En el siguiente apartado se comentan estos otros

resultados que tienen en cuenta los impactos indirectos y, por tanto, dan una visión más holística y realista del daño total, al incorporar las dinámicas y los feedbacks del modelo utilizado.

4.5. Sobre los Resultados Obtenidos de la Simulación del Modelo

En esta sección se evalúan los resultados de la simulación del modelo con la integración de las funciones de daño ante distintas evoluciones de incremento de temperatura media global.

En la Figura 58 se compara la función de daño al PIB que emerge de la simulación con algunas de las funciones más usadas en los modelos IAMs. Los tres escenarios más característicos (máximos, mínimos y mediana) se han representado con línea discontinua. Se observa que el escenario de mínimos (en verde) produce crecimiento económico para todos los incrementos de temperatura media global, no obstante, el escenario de máximos estima daños superiores a los que proyectan las funciones de Nordhaus y Weitzman, y cercanos a los estimados por la función de Hanemann. El crecimiento económico que se produce en el escenario de mínimos se debe a que el daño directo minora el stock de capital, pero no es suficiente para limitar la producción máxima como para que la producción real se vea restringida, esto mismo ocurre al principio con el escenario de máximos, pero en este caso, tras un cierto nivel de incremento de temperatura el daño aumenta lo suficiente para hacer que la producción máxima limite la producción real. De esta forma, aunque el stock de capital decrece y se debería potenciar la inversión, el stock de capital de equilibrio decrece también, en tanto que la producción real se ve afectada. No obstante, existe una gran variedad de dinámicas operando tras estos resultados y la extracción de conclusiones concretas, usando un prototipo de modelo económico, es complicada y está sujeta a cierta incertidumbre. A pesar de lo anterior, los resultados concuerdan con las conclusiones de (Kousky, 2014) ya que en este estudio se afirma que es posible que el cambio climático dé beneficios si solo se consideran algunos de sus impactos en tiempo y área reducidos. Teniendo en cuenta que en este

estudio solo se ha considerado una parte muy reducida del daño, estrictamente a las infraestructuras, los resultados para el escenario de máximos sugiere lo mismo que muchos estudios citados en este trabajo fin de grado ((Keen et al., 2021) o (Woillez et al., 2020)); algunas funciones de daño, como las que se muestran en la Figura 58, tienden a subestimar los daños ya que dichas funciones se supone que están capturando no una parte del daño, sino la pérdida económica total fruto del cambio climático y quedan por debajo del escenario de daños máximos que de este estudio se infiere.

Por otra parte, parece evidente que las funciones presentes en la literatura son funciones estilizadas y con una dinámica muy clara. En cambio, la función que emerge del módulo económico no es tan ideal, fruto de que ha sido estimada a partir de una metodología experimental que ha tenido en cuenta muchas dinámicas de daño y no solo un punto de calibración.

En cuanto a la Figura 59, de ella se deduce que los daños globales en el periodo final de simulación (menos de un 8% del PIB global) tienen una gran afectación a nivel regional. Aunque no se puede otorgar una gran validez a los resultados concretos que se han obtenido, debido a que el módulo económico aún es un prototipo, si se puede vislumbrar que el daño a nivel regional se multiplica y, además, existe una gran diferencia entre regiones, lo cual ya es señalado en algunos artículos como en (Kousky, 2014); el cambio climático afecta de forma distinta a las regiones y potencia la desigualdad.

En la Figura 60 se muestra la pérdida de PIB al cerrarse el “círculo” clima—economía y se compara con el anterior escenario SSP5. Como puede apreciarse, en el escenario de máximos el daño es mayor ante una trayectoria de emisiones más pesimista (temperatura exógena que evoluciona como un SSP5) que para la trayectoria de emisiones endógena al modelo. Para el escenario de mediana no hay apenas diferencias al principio, pero los últimos años de simulación

se puede advertir como con el escenario exógeno SSP5 el daño se dispara abruptamente y con el escenario más optimista se amortigua el daño y decrece. Esto cuadra con lo que Kousky, (2014) afirma: la economía a largo plazo se ve más dañada cuanto más se contamine, aunque en el corto plazo puede que el efecto no sea visible.

Capítulo 5. Conclusiones

5.1. Conclusiones Sobre el Uso de Variables Explicativas

Tal y como se ha comentado en apartados anteriores, la elección de una u otra variable independiente influye en la explicación del daño. Las inundaciones de interior, por ejemplo, son eventos íntimamente relacionados con la temperatura (esta variable es capaz de captar el incremento en su intensidad y su frecuencia debido al cambio climático) pero las precipitaciones son, sin duda, una parte esencial de esta tipología de daño. En algunos estudios como en (Zhang et al., 2021) se usa la variable incremento de precipitaciones para modelar las sequías y las inundaciones, mientras que el uso de la variable incremento de temperatura se restringe a los fenómenos relacionados estrictamente con el calor (olas de frío y calor). En esta sección se evalúan las consecuencias del uso de la temperatura como única variable explicativa.

Si se analizan las regresiones realizadas en este estudio, se puede observar el siguiente comportamiento; la temperatura, como covariable, explica mejor los fenómenos de calor (mayores R^2) que las inundaciones y su antitético, las sequías (que puntúan con R^2 más bajos). El evento climático incendios se encuentra en un punto intermedio entre las sequías y las olas de calor en cuanto a representatividad, pero en los últimos informes de la IPCC se les atribuye un comportamiento similar al de los fenómenos de calor.

En respuesta a la segunda pregunta de investigación planteada en los objetivos, se puede concluir que: a excepción de las tormentas de viento y el aumento del nivel del mar (que no han podido ser caracterizados en el ámbito de este TFG), se puede afirmar que la temperatura, como covariable, puede servir como una buena aproximación en la representación de impactos. Sin embargo, el uso de más variables explicativas permitiría realizar regresiones más complejas, que,

sin caer en fenómenos de sobreajuste, nos proporcionen un verdadero entendimiento de la evolución del daño.

5.2. Conclusiones Sobre las Formas Funcionales de Daño Directo

5.2.1. En relación con la primera pregunta de investigación planteada en los objetivos; de los resultados expuestos en el apartado “3.1.1 Formas Funcionales de Daño por Evento y Sector”, se confirma que existe una forma funcional predominante, siendo esta la cuadrática. En cambio, su concavidad depende del sector y de la región, así como del evento climático de estudio. En (Dokken, 2014b) se exponen algunos sectores cuyo daño va a ir en aumento, pero de una forma sub-amortiguada (p. ej. La demanda de calor), en cambio, relativo a otros sectores se comentan dinámicas monótonas crecientes (p. ej. las infraestructuras de tratamiento de aguas y de residuos), por lo que, en principio, no es de extrañar que existan distintas dinámicas de crecimiento dentro de la propia forma funcional cuadrática.

Por otra parte, en cuanto a los sectores más vulnerables frente al cambio climático (tercera cuestión planteada en los objetivos), se puede afirmar que son los sectores energéticos por presentar dinámicas exponenciales de daño directo, además del sector de tratamiento de aguas por la magnitud del daño que se observa en sus infraestructuras. Estas conclusiones no se alejan de lo que la literatura pronostica; como ya se ha comentado actualmente se está invirtiendo en medidas de adaptación para disminuir la vulnerabilidad de todos aquellos sectores para los cuales los recursos hídricos sean un componente clave, como es, en este caso, las plantas hidroeléctricas y las nucleares y por el mismo motivo, las de tratamiento de agua. Conclusiones parecidas son las que se obtienen en (Forzieri et al., 2018), aunque la argumentación y la perspectiva sea diferente,

ya que en esta parte del trabajo se han analizado las formas funcionales del daño y no tanto su magnitud.

5.3. Conclusiones Sobre los Resultados de la Simulación

En respuesta a la cuarta cuestión planteada en los objetivos: se puede concluir que las funciones son útiles debido a que el daño se disemina por el módulo económico y se ha podido detectar la cadena de daños indirectos dentro del modelo a través de los cuales el daño se amplifica o se reduce. También se han podido advertir las vías por las cuales se podría incentivar la economía a través de la destrucción de stock de capital; aplicar el daño directo al stock de capital en vez de al PIB facilita la comprensión de la respuesta de la economía ante el daño.

También se ha hecho visible, a partir de este estudio, que únicamente el daño a las infraestructuras críticas de Europa podría superar el daño económico total estimado por algunas funciones de daño presentes en la literatura, lo cual concuerda con lo que algunos autores advierten sobre la subestimación de los daños.

Por otra parte, en relación con la quinta pregunta de investigación planteada en los objetivos, el daño directo que se inyecta puede parecer de magnitud reducida en un momento inicial pero, en cambio, se ha corroborado que puede llegar a tener implicaciones macroeconómicas notables al considerar los daños indirectos en el prototipo de modelo económico, como puede advertirse del contraste de los resultados del apartado 3.2 y la gran pérdida que experimentan algunas regiones en 2075 (ver Figura 59). Nuevamente, esto concuerda con algunos artículos como en (Zhao et al., 2020).

Por otro lado, cabe cuestionarse si el PIB es un buen indicador de la “salud” de la economía o del bienestar, ya que, por ejemplo, cuando se producen beneficios en el escenario de máximos, si solo se analiza el PIB se podría concluir que la situación es beneficiosa y que no hay peligro,

pero en cambio, si se analiza la variable producción máxima, se advierte que esta va cayendo, lo cual sugiere que, en algún punto, a un determinado nivel de temperatura, comenzará a haber pérdidas económicas. En (Kousky, 2014) se profundiza sobre esta idea y se expone que el PIB presenta muchas limitaciones y que no puede tomarse como un medidor de bienestar social ya que el cambio climático produce muertes y destrucción de capital y esto, de ninguna forma puede ser deseable para una sociedad. De hecho, en este estudio se advierte que ninguna empresa puede beneficiarse de que su capital se vea destruido y que este “incentivo” a la inversión que se genera a niveles bajos de daño, podría haberse dedicado a crecer y desarrollarse sin haber sufrido pérdidas, es decir, contabilizando el coste de oportunidad las empresas no obtienen beneficios a nivel global. Señala, además, que la única forma de que las empresas paliaran el coste de oportunidad de sus inversiones por haber sufrido daños es que otro organismo, como el gobierno, pague dichas inversiones para que su pérdida neta sea nula. En todo caso, esto no propicia ningún bien social.

5.4. Limitaciones de la Metodología y Líneas Futuras de Trabajo

A medida que se avanza en las distintas fases del proceso metodológico se han asumido ciertas hipótesis y se ha simplificado el problema con el fin de poder llegar a probar las funciones y ver su comportamiento dentro del módulo económico. A continuación, se señalan algunas de las limitaciones que se han advertido y se proponen opciones de mejora.

- **En los datos de partida:** se considera discutible la forma en la que se ha caracterizado en (Forzieri et al., 2018) la vulnerabilidad de las infraestructuras críticas, factor que influye directamente en la metodología de estimación del daño directo. Este proceso se ha realizado, como ya se ha explicado, mediante una encuesta a expertos, pero por los resultados que exponen, en muchas ocasiones la diferencia entre una vulnerabilidad moderada o alta es simplemente un voto a favor de la primera en detrimento de la segunda, por lo que esta fase

es cuestionable. Del mismo modo, en el proceso de manipulación de los datos para estandarizarlos y obtener un porcentaje de daño se ha realizado, fuera del ámbito de este TFG, una etapa de “transcripción” de los sectores y del capital invertido en los mismos desde los datos de (Forzieri et al., 2018) a la clasificación sectorial utilizada en el modelo económico. Todo ello podría mejorarse con el empleo de distintas bases de datos y el contraste de distintas formas de caracterizar la vulnerabilidad.

- **Cálculo de las funciones de daño:** las principales limitaciones en este sentido residen en la metodología de extrapolación empleada y en la escasa variedad de variables explicativas del daño. Se aconseja la obtención de datos específicos para aquellas economías fuera de la UE y se cree conveniente acudir a las bases de datos en el ámbito de las aseguradoras. En cuanto a las variables explicativas; se considera importante el modelado de un módulo climático más complejo (previsto dentro del proyecto LOCOMOTION) capaz de generar distintos indicadores climáticos, como las precipitaciones, esenciales para caracterizar los eventos relacionados con el agua. Asimismo, se considera interesante modelar los eventos con funciones de daño estocásticas, es decir, con funciones de probabilidad en vez de deterministas.
- **Realización de las simulaciones:** para esta fase se ha empleado un prototipo de modelo económico que recoge algunas de las características que tendrá el modelo final del proyecto LOCOMOTION pero que aún es simple y, aunque sí está preparado para poder observar si el daño se disemina o no, puede incorporar incertidumbre por la falta de modelización y validación de algunas relaciones funcionales y datos.

Por último, cabe destacar algunos otros puntos que podrían afectar a los resultados y en los que se podría trabajar:

- El daño capturado en las funciones es una parte del daño que estos eventos ejercerán sobre los bienes de capital, concretamente sobre las infraestructuras, pero el daño sobre otra parte del capital (como la maquinaria) no se ha contabilizado.
- En la metodología se ha explicado cómo se debería diseminar el daño dentro del módulo económico, sin embargo, también podría haber un daño directo de otra naturaleza sobre distintas variables económicas (como la productividad del capital ...)
- Por otra parte, la vulnerabilidad de las infraestructuras es estática y cabría esperar que cambiase en función del daño que reciban los sectores y su cadena de influencias. Para ello habría que considerar otra clase de funciones, tal vez de parámetros no constantes. Finalmente, no existen relaciones entre el módulo climático y el económico con otros módulos que se prevé que estén en el IAM que se desarrolle en GEEDS. Estos otros módulos, como el energético o el demográfico, podrían proporcionar información valiosa que permita modificar la evolución de variables económicas o incluso, el establecimiento de límites sobre el crecimiento de estas.

5.5. Valoración Personal del Trabajo Realizado

Este trabajo fin de grado no ambiciona obtener resultados impactantes, sino comprender mejor cómo responde la economía al daño causado por el cambio climático. Por ello se ha introducido el daño al principio de la cadena y no al final, para poder observar e intentar deducir qué variables se verán afectadas. Se ha podido vislumbrar que el PIB a veces falla como indicador del bienestar económico porque mientras la producción máxima se veía mermada, el PIB aún no reflejaba el daño que sobrevenía. También se ha observado que el daño se disemina por todos los sectores y regiones, incluso por aquellos no afectados directamente. Del mismo modo se ha podido

observar que el cambio climático siempre causa impactos negativos cuando se analiza de forma global y a largo plazo, lo cual no es tan evidente como parece, según expone (Kousky, 2014).

Por lo expuesto anteriormente, cabe preguntarse si estamos observando las variables económicas adecuadas cuando se plantean las políticas. Incluso en las épocas en las que se producen “beneficios” aparentes, estos beneficios son a causa de perjudicar muchas otras variables físicas y sociales que no se han podido incluir en el prototipo. Los modelos no pueden abarcarlo todo y como sucede en la falacia de la ventana rota, del economista Frédéric Bastiat, el beneficio se ha calculado sin tener en cuenta los costes de oportunidad; “la sociedad pierde el valor de los objetos inútilmente destruidos” porque “la destrucción no es beneficio”.

Con la idea en mente de que las conclusiones que de este trabajo se infieren están sujetas a la incertidumbre que introduce el uso de un prototipo, aún simple y sin validar: cabe destacar que el daño se presenta superior a lo que la literatura suele pronosticar. Solamente considerando una tipología de daño (a las infraestructuras) se pueden observar grandes diferencias entre la evolución económica con y sin daño, por encima de lo que algunas funciones, criticadas en estudios como (Keen et al., 2021) o (Woillez et al., 2020), sugieren.

Por esta razón, personalmente, creo que esta clase de estudios enriquecen nuestro entendimiento de la economía desde lo más básico a los más complejo y es necesario profundizar en esta línea. No obstante, toda deducción sobre el daño económico debería ir acompañada de un contexto social y físico. No tiene sentido analizar el detrimento de la economía si se han llegado a cruzar barreras que causen daños físicos irreparables. Las políticas debieran plantearse con el propósito de no llegar a tales puntos, sea o no sea económicamente rentable.

Aún queda mucho por investigar en este campo y esto es solo un “pequeño paso”, bajo mi punto de vista, creo que el trabajo realizado (la estimación de funciones y la generación de un algoritmo de cálculo) va a ser útil en el futuro cuando se disponga del modelo completo que se está desarrollando en el proyecto LOCOMOTION. Seguramente entonces se puedan advertir y deducir muchos otros aspectos, y con mayor precisión, influyentes en la evaluación de impactos económicos del cambio climático.

Anexo A. Sub-sectores del proyecto LOCOMOTION.

| Sub-sectores | Descripción | Sub-sectores | Descripción |
|---------------------|--|---------------------|---|
| 1 | Cultivos | 17 | Extracción de arena, piedra y arcilla; extracción de minerales químicos y fertilizantes, producción de sal, otras actividades mineras y canteras |
| 2 | Producción animal, caza y otras actividades de servicios. | 18 | Productos alimenticios, bebidas y tabaco |
| 3 | Actividades forestales, madereras y otras actividades de servicios relacionadas. | 19 | Madera y productos de madera y corcho; productos de papel e imprenta |
| 4 | Pesca, explotación de criaderos de peces y piscifactorías; actividades de servicios relacionadas con la pesca. | 20 | Fabricación de productos de horno de coque |
| 5 | Minería de carbón y lignito; extracción de turba | 21 | Refinería de petróleo |
| 6 | Extracción de petróleo crudo y servicios relacionados con la extracción de petróleo crudo, excepto topografía | 22 | Productos químicos y farmacéuticos |
| 7 | Extracción de gas natural y servicios relacionados con la extracción de gas natural, excepto topografía | 23 | Productos de caucho y plástico |
| 8 | Extracción, licuefacción y regasificación de otros petróleos y materiales gaseosos | 24 | Otros productos minerales no metálicos |
| 9 | Extracción de minerales de uranio y torio | 25 | Metales básicos |
| 10 | Minería de minerales de hierro | 26 | Productos fabricados de metal |
| 11 | Extracción de minerales y concentrados de cobre | 27 | Productos informáticos, electrónicos y ópticos |
| 12 | Extracción de minerales y concentrados de níquel | 28 | Equipo eléctrico |
| 13 | Extracción de minerales y concentrados de aluminio. | 29 | Machinery and equipment, n.e.c. |
| 14 | Extracción de minerales y concentrados de metales preciosos | 30 | Vehículos de motor, remolques y semirremolques y otros equipos de transporte |
| 5 | Extracción de minerales y concentrados de plomo, zinc y estaño | 31 | Otras manufacturas, incluida la fabricación de muebles, textiles, prendas de vestir, cuero y productos relacionados; reparación e instalación de maquinaria y equipo. |
| 6 | Extracción de otros minerales y concentrados de metales no ferrosos | 32 | Producción de electricidad con carbón |

| Sub-sectores | Descripción | Sub-sectores | Descripción |
|---------------------|---|---------------------|--|
| 33 | Producción de electricidad con gas | 48 | Otro transporte terrestre |
| 34 | Producción de electricidad con nuclear | 49 | Transporte por tuberías |
| 35 | Producción de electricidad con hidroeléctrica | 50 | Transporte marítimo y acuático costero |
| 36 | Producción de electricidad con aerogeneradores | 51 | Transporte por aguas interiores |
| 37 | Producción de electricidad a partir del petróleo y otros derivados del petróleo | 52 | Transporte por aire |
| 38 | Producción de electricidad con fotovoltaica | 53 | Servicios de alojamiento y alimentación |
| 39 | Producción de electricidad por energía solar térmica | 54 | Telecomunicaciones, informática y otros servicios de información |
| 40 | Producción de electricidad a partir de biomasa y desechos, la producción de electricidad a partir de las mareas, las olas, el océano y la producción de electricidad a través de la energía geotérmica | 55 | Actividades financieras y de seguros |
| 41 | Transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica | 56 | Actividades inmobiliarias |
| 42 | Fabricación de gas; distribución de combustibles gaseosos por red | 57 | Otros servicios del sector empresarial, incluidos los servicios de apoyo a la minería y las actividades de transporte auxiliares y de apoyo. |
| 43 | Suministro de vapor y agua caliente | 58 | Administración pública y defensa; seguridad social obligatoria |
| 44 | Captación, depuración y distribución de agua; alcantarillado; actividades de recogida, tratamiento y eliminación de residuos; recuperación de materiales; actividades de remediación y otros servicios de gestión de residuos | 59 | Educación |
| 45 | Construcción | 60 | Salud humana y trabajo social. |
| 46 | Comercio al por mayor y al por menor; reparación de vehículos de motor | 61 | Artes, entretenimiento, recreación y otras actividades de servicios, incluidas las actividades editoriales, audiovisuales y de radiodifusión |
| 47 | Transporte por ferrocarril | 62 | Viviendas particulares con personas ocupadas |

Anexo B. Matrices de Extrapolación Sectorial y por Evento

| Cluster | Sub-sectors | HEAT | DROUGHT | FIRE |
|---|---|------|---------|------|
| Agriculture and forestry | 01, 02, 03 | | | |
| Fishing | 4 | | | |
| Mining | 05, 09,10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 24 | | | |
| Quarrying | 06,07,08, | | | |
| Refined Products Industry | 20,23 | | | |
| Refinery | 21 | | | |
| Chemicals | 22 | | | |
| Metals | 25, 26 | | | |
| Other manufactures | 18, 19, 27, 28, 29, 30, 31 | | | |
| Construction and real estate | 45, 56 | | | |
| Coal Power Plants | 32 | | | |
| Gas Power Plants | 33 | | | |
| Nuclear Power Plants | 34 | | | |
| Hydro power Plants | 35 | | | |
| Oil Power Plants | 37 | | | |
| Wind Power Plants | 36 | | | |
| Solar Power Plants | 38+39 | | | |
| Biomass Power Plants | 40 | | | |
| Electricity Transport | 41 | | | |
| Gas Pipelines | 49 | | | |
| Other energy activities | 42, 43 | | | |
| Water and waste | 44 | | | |
| Transport | 46, 47, 48, 50, 51, 52 | | | |
| Education and Health | 59, 60 | | | |
| Services supporting Mining and Transport (Transport Public Infrastructure included) | 57 | | | |
| Other Service Sectors | 53, 54, 55, 61, 62 | | | |
| Public admin. and defence | 58 | | | |

Referencias

- Alatorre, J. E., Caballero, K., Ferrer, J., & Galindo, L. M. (2019). *El costo social del carbono: Una visión agregada desde América Latina*. 50.
- Bhattacharya, A. (2019). Global Climate Change and Its Impact on Agriculture. En *Changing Climate and Resource Use Efficiency in Plants* (pp. 1-50). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816209-5.00001-5>
- Carbon Brief. (2018). *Q&A: How «integrated assessment models» are used to study climate change*. <https://www.carbonbrief.org/qa-how-integrated-assessment-models-are-used-to-study-climate-change/>
- De Blas, I., Miguel Gonzalez, L. J., & De Castro Carranza, C. (2021). INTEGRATES ASSESSMENT MODELS (IAMS) APPLIED TO CLIMATE CHANGE AND ENERGY TRANSITION. *DYNA*, 96(3), 316-321. <https://doi.org/10.6036/9922>
- 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.
<https://doi.org/10.1007/s10640-017-0197-5>
- Dietz, S., & Stern, N. (2015). Endogenous Growth, Convexity of Damage and Climate Risk: How Nordhaus' Framework Supports Deep Cuts in Carbon Emissions. *The Economic Journal*, 125(583), 574-620. <https://doi.org/10.1111/eoj.12188>
- Dietz, S., & Venmans, F. (2019). Cumulative carbon emissions and economic policy: In search of general principles. *Journal of Environmental Economics and Management*, 96, 108-129.
<https://doi.org/10.1016/j.jeem.2019.04.003>
- Doukas, H., & Nikas, A. (2020). Decision support models in climate policy. *European Journal of Operational Research*, 280(1), 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.01.017>

- Economipedia. (s. f.). *Precios constantes—Qué es, definición y concepto / 2022 / Economipedia*. Recuperado 27 de junio de 2022, de <https://economipedia.com/definiciones/precios-constantes.html>
- El País. (2013). *España, entre los países que más pagan por cumplir Kioto / Sociedad / EL PAÍS*. https://elpais.com/sociedad/2013/11/03/actualidad/1383513464_110043.html
- El País. (2014). *Europa cumple la reducción de emisiones del protocolo de Kioto / Sociedad / EL PAÍS*. https://elpais.com/sociedad/2014/06/03/actualidad/1401798742_648544.html
- ESA. (s. f.). *Remote sensing of tipping points in the climate system*. Recuperado 22 de junio de 2022, de <https://climate.esa.int/en/news-events/remote-sensing-tipping-points-climate-system/>
- Escoto Castillo, A., Sánchez Peña, L., & Gachuz Delgado, S. (2017). Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): Nuevas maneras de comprender el cambio climático y social. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 32(3), 669-693. <https://doi.org/10.24201/edu.v32i3.1684>
- EUR-Lex. (s. f.). *Protección de las infraestructuras críticas*. Recuperado 27 de junio de 2022, de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:jl0013>
- EUR-Lex. (2020). *Principio de «quien contamina paga» y responsabilidad ambiental*. <https://eur-lex.europa.eu/ES/legal-content/summary/the-polluter-pays-principle-and-environmental-liability.html>
- Forzieri, G., Bianchi, A., Silva, F. B. e, Marin Herrera, M. A., Leblois, A., Lavallo, C., Aerts, J. C. J. H., & Feyen, L. (2018). Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe. *Global Environmental Change*, 48, 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.11.007>

- Forzieri, G., Feyen, L., Russo, S., Voudoukas, 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*(1-2), 105-119. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1661-x>
- Franzke, C. L. E. (2021). Towards the development of economic damage functions for weather and climate extremes. *Ecological Economics*, *189*, 107172. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107172>
- FUND Model*. (s. f.). Recuperado 28 de junio de 2022, de <http://www.fund-model.org/>
- Gillingham, K., Nordhaus, W., Anthoff, D., Blanford, G., Bosetti, V., Christensen, P., McJeon, H., Reilly, J., & Sztorc, P. (2015). *Modeling Uncertainty in Climate Change: A Multi-Model Comparison* (N.º w21637; p. w21637). National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w21637>
- Glosario IPCC (2018)*. (s. f.).
- IEA. (2022). *CO2 emissions intensity of GDP, 1990-2021 – Charts – Data & Statistics—IEA*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/co2-emissions-intensity-of-gdp-1990-2021>
- IPCC (Ed.). (2000). *Emissions scenarios: Summary for policymakers; a special report of IPCC Working Group III* Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. (2021). *Technical Summary. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. (N.º AR6; p. 112).
- Job One for Humanity. (s. f.). *Understanding Critical Climate Change and Global Warming Tipping Points—Job One for Humanity*. Recuperado 22 de junio de 2022, de https://www.joboneforhumanity.org/climate_tipping_points

- Keen, S., Lenton, T. M., Godin, A., Yilmaz, D., Grasselli, M., & Garrett, T. J. (2021). *Economists' erroneous estimates of damages from climate change* (arXiv:2108.07847). arXiv. <http://arxiv.org/abs/2108.07847>
- Kellett, C. M., Weller, S. R., Faulwasser, T., Grüne, L., & Semmler, W. (2019). Feedback, dynamics, and optimal control in climate economics. *Annual Reviews in Control*, 47, 7-20. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.04.003>
- La Razón. (2022). *La ola de calor de junio causó la muerte de 714 personas en España*. <https://www.larazon.es/sociedad/20220629/alkfei4x3ngwxnfqaq57j374ti.html>
- 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. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(6), 1786-1793. <https://doi.org/10.1073/pnas.0705414105>
- LOCOMOTION-Deliverable-4.7_v.1.12.pdf*. (s. f.).
- Manes, S., Costello, M. J., Beckett, H., Debnath, A., Devenish-Nelson, E., Grey, K.-A., Jenkins, R., Khan, T. M., Kiessling, W., Krause, C., Maharaj, S. S., Midgley, G. F., Price, J., Talukdar, G., & Vale, M. M. (2021). Endemism increases species' climate change risk in areas of global biodiversity importance. *Biological Conservation*, 257, 109070. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109070>
- MITECO. (s. f.-a). *El comercio de derechos de emisión*. Recuperado 23 de junio de 2022, de <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/comercio-de-derechos-de-emision/que-es-el-comercio-de-derechos-de-emision/>
- MITECO. (s. f.-b). *Protocolo de Kioto*. Recuperado 23 de junio de 2022, de <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/naciones-unidas/protocolo-kioto.aspx>

- Nature. (2019). *Climate tipping points—Too risky to bet against*.
<https://www.nature.com/articles/d41586-019-03595-0>
- Nava Escudero, C. (2016). El Acuerdo de París. Predominio del soft law en el régimen climático. *Boletín Mexicano de Derecho Comparado*, 1(147), 99.
<https://doi.org/10.22201/ijj.24484873e.2016.147.10641>
- Óscar Carpintero & Jaime Nieto. (2022). *Transición energética y escenarios postcrecimiento – FUHEM*. <https://www.fuhem.es/2022/02/10/transicion-energetica-y-escenarios-postcrecimiento/>
- Pacheco, P. V. (2010). *Curvas de abatimiento de CO2*. 2.
- Rising, J. A., Taylor, C., Ives, M. C., & Ward, R. E. T. (2022). Challenges and innovations in the economic evaluation of the risks of climate change. *Ecological Economics*, 197, 107437.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107437>
- Scientific and Economic Background on DICE models*. (2020). William Nordhaus.
<https://williamnordhaus.com/dicerice-models>
- Siegel, L. S., Eker, S., Homer, J., Fiddaman, T., McCauley, S., Sawin, E., Jones, A. P., & Sterman, J. (2021). *EN-ROADS SIMULATOR REFERENCE GUIDE*. 409.
- Tirado Blázquez, M. C. (2010). Cambio climático y salud. Informe SESPAS 2010. *Gaceta Sanitaria*, 24, 78-84. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2010.10.004>
- Tsigaris, P., & Wood, J. (2019). The potential impacts of climate change on capital in the 21st century. *Ecological Economics*, 162, 74-86.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.04.009>

- UNFCCC. (s. f.-a). *Nationally Determined Contributions (NDCs) | UNFCCC*. Recuperado 26 de junio de 2022, de <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs/nationally-determined-contributions-ndcs>
- UNFCCC. (s. f.-b). *¿Qué es el Acuerdo de París? | CMNUCC*. Recuperado 23 de junio de 2022, de <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/que-es-el-acuerdo-de-paris>
- UNFCCC. (s. f.-c). *Qué es la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático | CMNUCC*. Recuperado 23 de junio de 2022, de <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-convention/que-es-la-convencion-marco-de-las-naciones-unidas-sobre-el-cambio-climatico>
- Watson, R. T., Baste, I. A., Larigauderie, A., Leadley, P., Pascual, U., Baptiste, B., Demissew, S., Dziba, L., Erpul, G., Fazel, A., Fischer, M., Hernández, A. M., Karki, M., Mathur, V., Pataridze, T., Pinto, I. S., Stenseke, M., Török, K., & Vilá, B. (2019). *El informe de la Evaluación Mundial sobre la Diversidad Biológica y los Servicios de los Ecosistemas*. 60.
- Weyant, J. (2017). Some Contributions of Integrated Assessment Models of Global Climate Change. *Review of Environmental Economics and Policy*, 11(1), 115-137. <https://doi.org/10.1093/reep/rew018>
- Wuillez, M.-N., Gaël Giraud, & Antoine Godin. (2020). *Economic impacts of a glacial period: A thought experiment to assess the disconnect between econometrics and climate sciences*. <https://esd.copernicus.org/articles/11/1073/2020/>
- Yumashev, D. (s. f.). *PAGE – ICE Integrated Assessment Models*. 29.

Zhang, H., Liu, C., & Wang, C. (2021). Extreme climate events and economic impacts in China:

A CGE analysis with a new damage function in IAM. *Technological Forecasting and Social Change*, *169*, 120765. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120765>

Zhao, Z.-J., Chen, X.-T., Liu, C.-Y., Yang, F., Tan, X., Zhao, Y., Huang, H., Wei, C., Shi, X.-L.,

Zhai, W., Guo, F., & van Ruijven, B. J. (2020). Global climate damage in 2 °C and 1.5 °C scenarios based on BCC_SESM model in IAM framework. *Advances in Climate Change Research*, *11*(3), 261-272. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2020.09.008>