



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Organización Industrial

**Análisis sectorial del cambio climático en
escenarios de transición energética.**

Autor:

Prieto de la Viuda, Víctor Manuel

Tutor(es):

**Miguel González, Luis Javier
Ingeniería de Sistemas y Automática**

**Capellán Pérez, Iñigo
Ingeniería de Sistemas y Automática**

Valladolid, 17 de septiembre de 2020

RESUMEN

El aumento de la temperatura media global, provocado por el cambio climático, pone en peligro la sostenibilidad económica de la sociedad humana en este siglo. Por ello, es necesario, aunque resulte complejo, la valoración de los posibles impactos climáticos en la economía mundial. Esta cuantificación de los daños económicos del clima, realizada bajo diferentes escenarios socioeconómicos y en tres sectores económicos, es el objetivo general de este Trabajo Fin de Grado. Las funciones de daño sectoriales son estimadas e introducidas en el modelo MEDEAS-W elaborado en el software VENSIM para, tras simularlo, obtener la evolución temporal del PIB mundial con y sin daños climáticos. Los resultados muestran que el mejor camino a tomar es el del desarrollo sostenible y que, además, se deben calcular las funciones de daño del resto de sectores para obtener resultados más verídicos.

PALABRAS CLAVE: Impactos climáticos, Funciones de daño, MEDEAS-W, Análisis sectorial, Input-Output.

ABSTRACT

The rise in global average temperature, caused by climate change, threatens the economic sustainability of human society in this century. For this reason, it is necessary, although complex, to assess the possible climate impacts on the world economy. This quantification of the economic damages of the climate, carried out under different socioeconomic scenarios and in three economic sectors, is the general objective of this Project. The sectoral damages functions are estimated and entered in the MEDEAS-W model elaborated in the VENSIM software in order, after simulating it, to obtain the temporal evolution of world GDP with and without climatic damages. The results show that the best path to take is that of sustainable development and that, in addition, the damage functions of the rest of the sectors must be calculated to obtain more truthful results.

KEYWORDS: Climate impacts, Damage functions, MEDEAS-W, Sectorial analysis, Input-Output.

ÍNDICES

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	9
2. REVISIÓN LITERARIA	11
3. MODELO MEDEAS	15
4. METODOLOGÍA INPUT-OUTPUT	23
4.1. ELEMENTOS DE LA ECONOMÍA INTERSECTORIAL Y DESARROLLO DE LA MATRIZ INPUT-OUTPUT	23
4.2. EL COEFICIENTE TÉCNICO DE LA MATRIZ INPUT-OUTPUT	28
4.3. LA MATRIZ INVERSA DE LEONTIEF	29
4.4. VALORACIÓN DE LOS IMPACTOS DE LOS DESASTRES NATURALES CON LA METODOLOGÍA INPUT-OUTPUT	30
5. JUSTIFICACIÓN DE LA ELECCIÓN DE LOS SECTORES A ESTUDIAR	35
5.1. AGRICULTURA	37
5.2. TURISMO	39
5.3. TRANSPORTE TERRESTRE	41
6. DESARROLLO Y ANÁLISIS DE ECUACIONES PARA LA REPRESENTACIÓN DE LOS DAÑOS SECTORIALES	45
6.1. FUENTES DE DATOS UTILIZADAS	45
6.2. METODOLOGÍA	51
6.2.1 <i>Dinámica de sistemas</i>	51
6.2.2 <i>Estimación de las funciones de impacto económico</i>	56
7. INTRODUCCIÓN DE LAS FUNCIONES DE DAÑO EN MEDEAS-W	59
7.1. MODIFICACIÓN DE LOS INPUTS DEL MODELO	59
7.2. MODIFICACIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJOS EN VENSIM	62
8. RESULTADOS OBTENIDOS	71
8.1. ELECCIÓN Y SIMULACIÓN DE LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS	71
8.2. EFECTO DE LAS FUNCIONES DE DAÑO EN LA ECONOMÍA MUNDIAL	74
8.2.1 <i>Influencia de las funciones de daño en el escenario BAU</i>	75
8.2.2 <i>Influencia de las funciones de daño en el Escenario 1</i>	80
8.2.3 <i>Influencia de las funciones de daño en el Escenario 2</i>	84
8.2.4 <i>Comparación de los tres escenarios</i>	87
8.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	92
8.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON LA LITERATURA REVISADA	97
9. CONCLUSIONES	101
BIBLIOGRAFÍA	103
ANEXO 1. TABLAS Y GRÁFICOS	111

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Matrices que componen una tabla input-output _____	24
Gráfico 2. Mapa mundial de los % de la agricultura en los PIB nacionales (2018) ____	38
Gráfico 3. Evolución % de la agricultura en el PIB mundial (1995-2017) _____	38
Gráfico 4. Evolución de la llegada de turistas en los países más visitados _____	40
Gráfico 5. Los diez países que más ingresos por turismo reciben (2019) _____	40
Gráfico 6. Cambios en el rendimiento promedio de los cultivos _____	46
Gráfico 7. Respuesta tipo de un sistema sigmoidal a lo largo del tiempo _____	55
Gráfico 8. Variación temporal de la temperatura en los tres escenarios elegidos ____	73
Gráfico 9. “Uniform” VS “Per_Sector” para PIB mundial en el escenario BAU _____	76
Gráfico 10. “Uniform” VS “Per_Sector” para PIB agrícola en el escenario BAU _____	77
Gráfico 11. Pérdidas anuales en agricultura según simulación en BAU _____	78
Gráfico 12. Incrementos de temperatura en las simulaciones de BAU _____	79
Gráfico 13. “Uniform” VS “Per_Sector” para PIB sectoriales en el escenario BAU ____	79
Gráfico 14. Pérdidas anuales sectoriales según simulación en BAU _____	80
Gráfico 15. “Uniform” VS “Per_Sector” para PIB mundial en el Escenario 1 _____	81
Gráfico 16. “Uniform” VS “Per_Sector” para PIB agrícola en el Escenario 1 _____	82
Gráfico 17. Incrementos de temperatura en las simulaciones del Escenario 1 _____	83
Gráfico 18. “Uniform” VS “Per_Sector” para PIB sectoriales en el Escenario 1 _____	84
Gráfico 19. “Uniform” VS “Per_Sector” para PIB mundial en el Escenario 2 _____	85
Gráfico 20. “Uniform” VS “Per_Sector” para PIB agrícola en el Escenario 2 _____	86
Gráfico 21. Incrementos de temperatura en las simulaciones del Escenario 2 _____	86
Gráfico 22. “Uniform” VS “Per_Sector” para PIB sectoriales en el Escenario 2 _____	87
Gráfico 23. Comparación de PIB de los escenarios sin impactos climáticos _____	88
Gráfico 24. Comparación de PIB de los escenarios con impactos climáticos _____	89
Gráfico 25. Incrementos de temperatura en los tres escenarios _____	91
Gráfico 26. Comparación de las dos funciones de daño del sector agrícola _____	93
Gráfico 27. Comparación de las funciones de daño del transporte terrestre _____	94
Gráfico 28. Análisis de sensibilidad de las distintas funciones de daño en BAU ____	95
Gráfico 29. Sensibilidad de las distintas funciones de daño en el Escenario 1 _____	96
Gráfico 30. Sensibilidad de las distintas funciones de daño en el Escenario 2 _____	97
Gráfico 31. Diversas estimaciones de pérdidas del PIB según incremento de T ^a _____	99
Gráfico 32. Regresiones lineales para los tres sectores estudiados _____	116
Gráfico 33. Regresiones exponenciales para los tres sectores estudiados _____	117
Gráfico 34. Regresiones logarítmicas para los tres sectores estudiados _____	118
Gráfico 35. Regresiones polinómicas para los tres sectores estudiados _____	119
Gráfico 36. Regresiones potenciales para los tres sectores estudiados _____	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Los 35 sectores económicos de WIOD _____	18
Tabla 2. Tabla input-output general _____	26
Tabla 3. Sectores económicos de la base de datos WIOD _____	35
Tabla 4. Cambios en la producción total de cultivos _____	46
Tabla 5. Daños del SLR en 25 cm sobre el valor de las tierras perdidas _____	48
Tabla 6. Variación de los impactos directos del clima en el transporte austriaco ____	49
Tabla 7. Funciones de regresión seleccionadas para cada uno de los sectores _____	57
Tabla 8. Activación de los impactos climáticos _____	60
Tabla 9. Elección de las funciones de daño que afectan a cada sector _____	61
Tabla 10. Parámetros de las funciones de daño como inputs del modelo _____	61
Tabla 11. Valores de los PIB de los escenarios sin impactos climáticos _____	88
Tabla 12. Valores de los PIB de los escenarios con impactos climáticos _____	90
Tabla 13. Incrementos de temperatura al final del siglo en los tres escenarios ____	91
Tabla 14. Valores de los PIB según distintas funciones de daño en BAU _____	95
Tabla 15. Valores de los PIB según distintas funciones de daño en Escenario 1 ____	96
Tabla 16. Valores de los PIB según distintas funciones de daño en Escenario 2 ____	97
Tabla 17. Matriz input-output de España del año 2016 en millones de euros. <i>Fuente:</i> (INE, 2019) _____	111
Tabla 18. Recopilación de estimaciones de daños encontradas en la literatura para el sector agrícola (en la base de datos WIOD: 1. Agricultura, caza, pesca y silvicultura) _____	113
Tabla 19. Recopilación de estimaciones de daños encontradas en la literatura para el sector turístico (en la base de datos WIOD: 22. Hoteles y restauración) _____	114
Tabla 20. Recopilación de estimaciones de daños encontradas en la literatura para el sector del transporte terrestre (en la base de datos WIOD: 23. Transporte terrestre) _____	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general de los módulos de MEDEAS-World y sus relaciones _____	15
Figura 2. Visión esquemática del módulo de Economía en MEDEAS _____	19
Figura 3. Visión general del módulo Clima de MEDEAS _____	20
Figura 4. Ejemplo de una cadena cerrada de relaciones causales _____	53
Figura 5. Comportamiento de los bucles positivo y negativo en el tiempo _____	53
Figura 6. Ejemplo de diagrama de flujos en VENSIM _____	56
Figura 7. Pestañas creadas en VENSIM para reproducir el modelo MEDEAS-W _____	63
Figura 8. Variables que representan las funciones de daño sectoriales _____	64
Figura 9. Cuadro de diálogo para los parámetros de las DF en VENSIM _____	65
Figura 10. Inserción de los parámetros de cada escenario climático en VENSIM _____	65
Figura 11. Cuadro de diálogo para las funciones de daño en VENSIM _____	66
Figura 12. Implementación de la DF lineal del sector agrícola en VENSIM _____	67
Figura 13. Implementación de la DF logarítmica del transporte terrestre en VENSIM _____	67
Figura 14. Elección del escenario climático con el que se simula el modelo _____	68
Figura 15. Inserción de las DF en la dinámica del modelo en VENSIM _____	69
Figura 16. Cuadro de diálogo de la variable “per sector DF” en VENSIM _____	69

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La actividad humana está provocando que el cambio climático se esté desarrollando de una forma muy rápida, lo cual conlleva que la temperatura media global esté creciendo a pasos agigantados. Esto se puede comprobar en (ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL, 2019), en donde se declara que, en el período de 2015-2019, la temperatura media mundial ha aumentado en 1,1°C desde la era preindustrial y en 0,2°C con respecto a los años comprendidos entre 2011 y 2015. Debido a esta situación, en la cumbre climática de París de 2015 se estableció como objetivo que el incremento de temperatura a final de siglo sea de entre 1.5°C y 2°C. Sin embargo, se está demostrando que estos niveles continúan siendo peligrosos para el bienestar económico y social, por lo que sigue resultando necesario implementar políticas sostenibles lo más temprano posible.

Para poder estimar el alcance de los daños que el cambio climático puede infligir en la sociedad, se hace necesario desarrollar modelos que simulen el sistema Planeta Tierra-Sociedad Humana. Este sistema recoge cómo la actividad humana deteriora en mayor o menor grado la salud del planeta y, al mismo tiempo, cómo esa alteración del clima provoca daños en la sociedad humana.

Dicho esto, se debe hablar de que una parte de estos modelos estudia el cómo los impactos climáticos afectan a la producción económica mundial, la cual se mide, habitualmente, a través del PIB. Muchos autores resaltan la necesidad de desagregar este análisis a través de la actividad de los sectores económicos, lo cual permite generar esos efectos indirectos o de arrastre que ocurren en la realidad dentro de las interacciones intersectoriales. De manera representativa, se puede imaginar cómo un huracán destruye una nave industrial produciéndola unos daños directos. Además, la obliga a tener que detener su producción. Debido a ello, sus empleados dejan de cobrar su salario por lo que empiezan a consumir a menos, lo cual genera que otros negocios también disminuyan sus ingresos. Lo mismo ocurre en el caso de los sectores económicos.

Por lo tanto, el principal objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es conseguir estimar funciones de daño (DF) robustas¹ para un grupo de sectores económicos. Además, a través de su implementación en un modelo representativo del sistema Planeta Tierra-Sociedad Humana, se busca conseguir ver qué tipo de políticas económicas y ambientales conducen a una mejor situación de la sociedad humana a finales de siglo. De lo anterior se

¹ Un método estadístico o de cálculo es robusto cuando sus resultados no se ven afectados por la existencia de valores atípicos en la muestra.

deduce que se debe simular el modelo bajo varios escenarios distintos para, de esta manera, poder comparar los resultados obtenidos en ellos. Asimismo, también se quiere observar cómo varían los resultados al modificarse levemente esas funciones de daño para, con ello, observar el grado de sensibilidad que poseen. Por último, resulta interesante el comparar los resultados obtenidos con las estimaciones que se han conseguido en la literatura. Así, se puede tener una referencia de dónde se ubican las conclusiones extraídas dentro del marco de los estudios científicos.

En el Capítulo 2 se recoge toda la información obtenida en la búsqueda bibliográfica, la cual sirve como paso previo al desarrollo de este trabajo.

En el Capítulo 3 se presenta el modelo MEDEAS, que es el que se va utilizar en la elaboración de este TFG. Mientras tanto, en el Capítulo 4 se explica en qué consiste la metodología input-output, la cual es empleada para representar los flujos económicos entre los distintos sectores.

Después, en el Capítulo 5 se justifica el por qué se decide calcular las funciones de daños para esos sectores económicos. Seguidamente, en el Capítulo 6 se desarrolla cómo se obtienen dichas funciones de daños climáticos.

Más tarde, en el Capítulo 7 se explica cómo se introducen las funciones daños en el modelo MEDEAS-W para, después, mostrar y comentar los resultados obtenidos con la simulación de este modelo en el Capítulo 8. Ambas secciones están acompañadas del libro Excel “inputs_W” y el modelo implementado en VENSIM “MEDEAS-W_v167_2_1”, los cuales se entregan como archivos adjuntos.

Por último, en el Capítulo 9 se muestran las conclusiones obtenidas con la elaboración de este trabajo.

2. REVISIÓN LITERARIA

Algunas estimaciones apuntan a una variación de la temperatura de +4°C para finales de este siglo, como por ejemplo (IPCC 2018 Global Warming of 1.5°C, 2018). Esto hizo que en la cumbre climática de París de 2015 se pusiera como objetivo el conseguir solamente un aumento de +1.5/+2°C, pero científicamente se ha demostrado que esta aspiración tampoco es segura para la sostenibilidad de la sociedad humana. Por lo tanto, son necesarias acciones correctivas para mitigar los impactos del cambio climático (Capellán Pérez & de Castro, 2019). Aunque resulte complicado debido a las complejas interacciones e incertidumbres del sistema Planeta Tierra-Sociedad Humana, se hace importante comprender el valor de reducir los gases de efecto invernadero para las políticas y gestiones del cambio climático (Diaz & Moore, 2017).

Para poder evaluar los peligros del cambio climático (DCC) sobre la actividad humana, se emplean Modelos de Evaluación Integrada (IAM), los cuales integran todas las dimensiones e interacciones relevantes de los sistemas Tierra-Hombre (Capellán Pérez & de Castro, 2019). Estos modelos utilizan Funciones de Daños (DF) que representan un papel clave en la cuantificación, comparación, agregación y comunicación de los riesgos económicos que tiene la sociedad con el cambio climático. Estas funciones relacionan variables climáticas (temperatura, CO₂ en la atmósfera, nivel del mar (SLR)) con el bienestar económico. Poseen ciertas limitaciones, por lo que se hace necesario incorporar impactos, adaptación, avances de investigación de vulnerabilidad y resultados empíricos (Diaz & Moore, 2017). Es importante resaltar que existe una enorme cantidad de discrepancias entre las conclusiones obtenidas por las distintas comunidades de modelado del efecto del cambio climático en la sociedad humana. Estas familias de modelado son el Sistema de Modelado de la Tierra (ESM), Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad (IAV) e IAM. Sus resultados muestran que los impactos varían dramáticamente en todo el mundo, con grandes incertidumbres de los mismos asociados con diferencias en la magnitud y patrones de cambio climático de diferentes modelos, poniendo así en tela de juicio la idoneidad de las DF sobre la base de la temperatura media global y su impacto en el bienestar humano (Monier, y otros, 2018).

Existen dos métodos para trabajar con los IAM. El primero es un escenario BAU sin DF que no cuenta con restricciones de energía ni daños propiciados por el cambio climático, lo cual refleja una continuación de las tendencias actuales. Evita complejidades e incertidumbres en estimación de daños climáticos, ahorra los costes de estabilizar las temperaturas y resulta ser un buen enfoque para selección de inversiones. En el segundo método sí que se incluyen

impactos climáticos en IAM de costo-beneficio a través de una DF. Cuenta con limitaciones de reducir los impactos a un valor monetario, pero mejora la calidad del modelado al activar el DF con los daños, consiguiendo resultados más reales (Capellán Pérez & de Castro, 2019). En este método se incluye el coste social del carbono (SCC), el cual refleja el coste monetario de los daños en mercado (agricultura, infraestructura...) y en bienes no comerciales (salud y ecosistemas) en el tiempo para una tonelada adicional de CO₂ (Diaz & Moore, 2017).

Se generan varias perspectivas al incorporar la investigación de IAV en IAM, provocando avances en estos últimos. La primera de ellas incorpora modelos biogeofísicos y económicos detallados para representar los impactos. Informan en función de recursos u otras medidas físicas, siendo contrario a impactos monetizados, consumo o bienestar. Ofrecen una caracterización mejorada del dominio del enfoque, aunque son todavía propensos a las limitaciones en la caracterización de la incertidumbre. La segunda perspectiva busca un modelo coordinado multisectorial, el cual requiere muchos recursos. Necesitan monetizar sus resultados no monetarios como, por ejemplo, el % de productividad. La tercera y última perspectiva busca utilizar estudios empíricos para valorar los impactos. Las estimaciones derivan directamente de los resultados observados del mundo real, aprovechándose del entorno actual rico en datos, pudiendo parametrizarlas en una relación simple clima-resultado (Diaz & Moore, 2017).

Un aspecto clave en estos modelos es incluir varios sectores e identificar áreas donde los riesgos de uno pueden conducir a la debilitada capacidad de adaptación de otro. Así, aunque sean difíciles de implementar, se consiguen fallos en cascada entre sectores y una visión mayor del impacto (Martinich & Crimmins, 2019). Además, es interesante realizar esta evaluación multisectorial de los efectos del clima bajo una variedad de escenarios climáticos y económicos (Monier, y otros, 2018).

Uno de los sectores más relevantes es el de la energía. Esto es así porque es crucial para satisfacer las necesidades humanas básicas y el bienestar general, además de ser clave para el desarrollo de la sociedad. También es importante recordar que sus actividades son fuentes de gases de efecto invernadero (GEI) (Bauer, y otros, 2017). Es complicado descarbonizar servicios de energía a otros sectores dependientes de la misma como el transporte o las industrias del acero y del cemento (Davis, y otros, 2018). Además, el cambio climático afecta a la demanda de energía (Taseska, Markovska, & Callaway, 2012).

Ligado al sector de la energía está el sector del transporte, ya que existe una fuerte relación entre el consumo de energía que este realiza y las emisiones que produce (Danish, Awais Baloch, & Suad, 2018). Los vehículos de pasajeros por carretera son los principales emisores, y estos se espera que crezcan en

número debido al aumento de población y de motorización (Zhang, Fujimori, Dai, & Hanaoka, 2018). Es un sector clave para el desarrollo económico y, a su vez, muy vulnerable al cambio climático y sus eventos extremos. Por lo tanto, se hace imprescindible adaptar bien sus infraestructuras y evitar, así, daños como los que las inundaciones ejercen al transporte por carretera (Vajjarapu, Verma, & Gulzar, 2019).

Otro sector importante es el de la agricultura. Da alimento y es clave en muchas economías mientras que su rendimiento es vulnerable al cambio climático. Si hay alta concentración de CO₂ en la atmósfera el rendimiento del cultivo aumenta, pero este último disminuye si la temperatura aumenta o las precipitaciones escasean (Ren, y otros, 2018). La ganadería, que apoya en el aporte de alimento y que depende de la agricultura para alimentar a los animales y poder utilizar pastos, contribuye al 14,5% de las emisiones (Rojas-Downing, Nejadhashemi, Harrigan, & Woznicki, 2017). Los ingresos que genera la pesca se ven muy alterados debido a la influencia que ejerce el cambio climático en la temperatura, salinidad, nivel de oxígeno o extensión del hielo en los océanos (Lam, Cheung, Reygondeau, & Sumaila, 2016).

Por último, se encuentra el sector del turismo, el cual es uno de los sectores más grandes económicamente hablando. El turismo es sensible al cambio climático, ya que éste puede provocar grandes cambios en los flujos de personas que se producen debido a este sector. Esto es así por el hecho de que los diferentes tipos de actividades que realizan las personas para su ocio tienen diversos requisitos climáticos, como se puede ver, por ejemplo, con los casos del turismo de playa o del turismo de nieve (Amelung & Moreno, 2012). Otro hecho que muestra los evidentes impactos directos que el cambio climático ejerce sobre los activos turísticos es la subida del nivel del mar, el cual golpea a las zonas costeras y destruye numerosos hoteles y zonas de recreo como son las playas (Bigano, Bosello, Roson, & S. J. Tol, Economy-wide impacts of climate change: a joint analysis for sea level rise and tourism, 2008).

En párrafos anteriores se mencionó que en los IAM se incluyen DF de costo-beneficio que permiten valorar, de manera económica, los impactos del cambio climático y los beneficios que pueden aportar la mitigación y la adaptación. Para ello, es imprescindible estimar bien los costes de los impactos climáticos para estimar correctamente los beneficios. Pero bien es sabido que los costes de mitigación aumentan si esta se retrasa, y que los precios y rendimientos de las tecnologías y los combustibles fósiles fluctúan en el tiempo. Por lo tanto, surge la duda de si se pueden conocer con precisión las incertidumbres de estos resultados económicos como para poder informar a políticos y público en general (Rosen & Guenther, 2015).

De manera intuitiva se sabe que la infraestructura limpia que permitirá lograr las cero emisiones necesita financiación. A raíz de esto aparece la pregunta de

si las finanzas públicas podrán soportar este desembolso inicial ya que, actualmente, son muy vulnerables. Aquí cobra importancia el papel del sector privado para ayudar a financiar estas inversiones a largo plazo, pero ahora vuelve a surgir una nueva cuestión: ¿la economía mundial podrá soportar la carga de la deuda privada? (Giraud, Mc Isaac, & Bovari, 2018).

Por último, se debe hablar de que el cambio climático influye en el empeoramiento de los desastres naturales, alterando su frecuencia, intensidad, extensión, duración y/o calendario (Kousky, 2014). Esto convierte a humanos, construcciones y sistemas naturales más vulnerables a ellos. Además, estos eventos extremos son difíciles de cuantificar por su imprevisibilidad futura (Perera, Nik, Chen, Scartezzini, & Hong, 2020). La falta de datos completos y sistemáticos y la gran cantidad de subestimaciones de todas las pérdidas también dificultan las estimaciones de sus costes económicos (Kousky, 2014).

Estos eventos climáticos extremos generan impactos directos, que son la destrucción física de un desastre (ajena al mercado o no), e impactos indirectos, que son el seguimiento de las consecuencias, ajenas al mercado o no, de la destrucción (proveedor afectado por la destrucción de su cliente, por ejemplo). Los primeros son difíciles de medir debido al cambio del valor de mercado antes y después del accidente, la pérdida de valor de los impuestos que son destinados al accidente y no a lo que estaban previstos, el tiempo perdido y trauma de las personas, etc. Los segundos porque es difícil cuantificar la modificación de la conducta de la gente por la percepción del riesgo, las muertes derivadas por el agua sucia, que se beneficie el sector de la construcción y el resto sean perjudicados, etc. Las aseguradoras son un buen indicador de los gastos (Kousky, 2014).

Cabe mencionar que existe una variación geográfica de los daños de estos desastres. Algunos países son más propensos que otros a tener más eventos extremos, y la riqueza no evita esto, aunque sí que permite desarrollar unas mejores mitigación y adaptación (Kousky, 2014). Por otro lado, existen eventos de alta probabilidad y de bajo impactos e impactos de baja probabilidad y alto impacto (Perera, Nik, Chen, Scartezzini, & Hong, 2020). Obviamente, los segundos generan el mayor porcentaje de los daños totales (Kousky, 2014).

Ante la pregunta de si los desastres pueden tener impactos positivos, la respuesta es rotundamente no. El dinero sólo se mueve de una inversión a otra tras el desastre y, además, como el PIB no refleja el bienestar de la sociedad, este no incluye las muertes y los contratiempos que sufren las vidas de las personas. A la par que esto, el desarrollo tecnológico posterior a estos eventos en países desarrollados es insignificante ya que se hubiera llevado a cabo igualmente (Kousky, 2014).

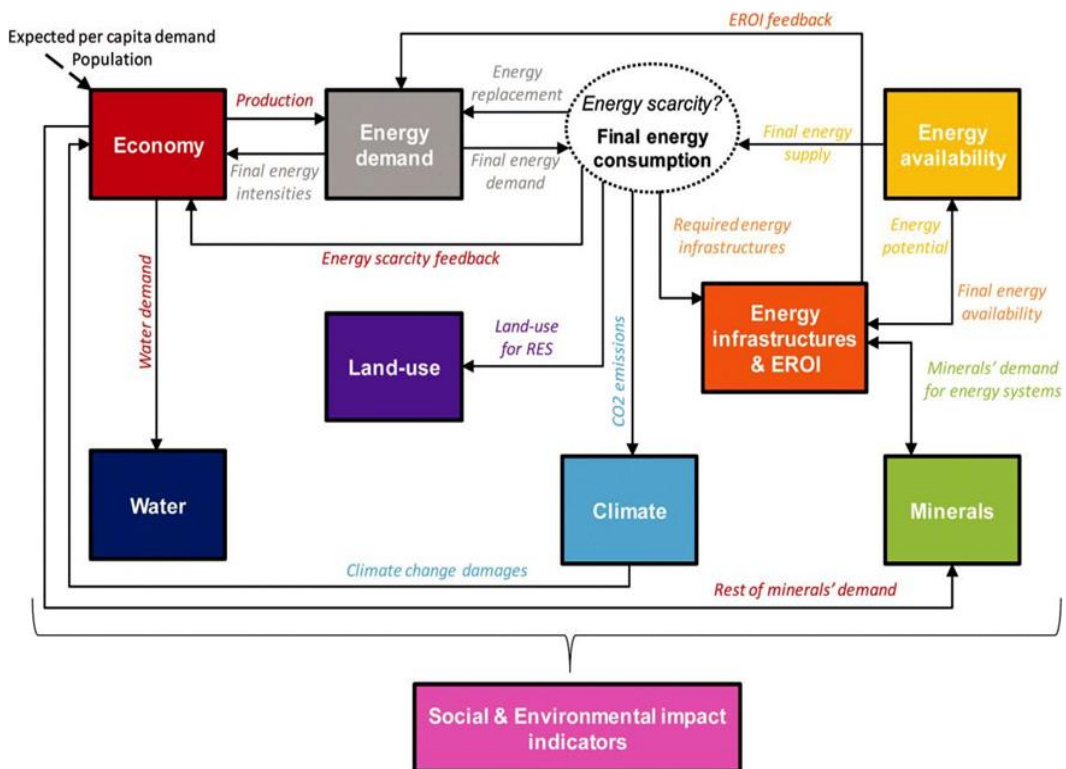
3. MODELO MEDEAS

El proyecto MEDEAS (Modelling the Energy Development under Environmental And Socioeconomic constraints) posee como meta elaborar un nuevo modelo computacional que delimitará el devenir del sistema energético en Europa, teniendo en cuenta las restricciones físicas y sociales. Desarrolla una herramienta de modelado avanzada para crear, modificar y probar políticas nuevas y existentes que buscarán apoyar la evolución a un sistema energético europeo más sostenible, sustentado en fuentes de energía renovables (MEDEAS, 2020).

El modelo MEDEAS-World es un modelo global agregado de economía, energía y medio ambiente (o Modelo de Evaluación Integrada, IAM) que se extiende desde 1995 hasta 2050. Ha sido diseñado utilizándose la dinámica de sistemas, la cual facilita la integración del conocimiento desde diferentes perspectivas, así como los comentarios de diferentes subsistemas. Está constituido por una estructura modular y flexible en la que cada módulo se puede modificar (MEDEAS, 2020). Para más información acudir a www.medeas.eu.

En la Figura 1 se aprecia la estructura de los módulos de MEDEAS-World:

Figura 1. Esquema general de los módulos de MEDEAS-World y sus relaciones



Fuente: (Capellán Pérez, y otros, 2020)

- Economía: este módulo se modela con mercados no compensadores, por lo que no se fuerza el equilibrio general, y con un crecimiento impulsado por la demanda y complementariedad del sector. De este modo, la producción es determinada por la demanda final y la estructura económica, junto con limitaciones del lado de la oferta como puede ser la disponibilidad de energía. La estructura económica está basada en la adaptación e integración dinámica de los 35 sectores presentes en las globales de entrada-salida de WIOD.
- Demanda de energía: la demanda final de energía por sector y hogares se calcula por medio de la proyección de la producción económica sectorial y las intensidades energéticas sectoriales finales, teniendo en cuenta las mejoras de eficiencia y los reemplazos energéticos catapultados por políticas y por la escasez física.
- Disponibilidad de energía: este módulo incluye el potencial y la disponibilidad de fuentes de energías renovables (RES) y recursos de energías no renovables, sin olvidar las limitaciones biofísicas y temporales. En total, se tienen en cuenta 25 fuentes y tecnologías de energía y 5 energías finales (electricidad, calor, sólidos, gases y líquidos) con gran desagregación tecnológica. La intermitencia de RES en el modelo se computa a través de niveles endógenos de sobrecapacidades, almacenamiento y nuevas redes eléctricas, dependiendo de la penetración de tecnologías RES variables.
- Infraestructuras de energía y EROI: este módulo traza las capacidades para generar electricidad y calor teniendo en cuenta retrasos en la planificación y en la construcción. Las inversiones en energía para que las RES originen electricidad se modelan de forma endógena y dinámica, de modo que se puede estimar el retorno de energía de la inversión energética (EROI) de las tecnologías individuales y de todo el sistema energético. La demanda de energía varía en función del EROI del sistema. El transporte se modela detalladamente, diferenciando entre distintas clases de vehículos para los hogares, como también entre transporte terrestre de carga y de pasajeros.
- Minerales: la economía requiere de estos recursos, incluidos los que son empleados para la construcción, operación y mantenimiento de tecnologías de energía alternativa. También están disponibles las políticas de reciclaje.

- Uso de la tierra: este módulo expresa fundamentalmente los requisitos de tierra adicionales de RES.
- Agua: este módulo arroja el uso del agua por tipos (azul, verde y gris), por sector económico y para uso en los hogares.
- Clima/emisiones: el modelo global estima los niveles de cambio climático a partir de los GEI emitidos por la sociedad humana. Este módulo incluye una DF que transforma el aumento de los niveles de cambio climático en daños a los sistemas humanos.
- Indicadores de impactos sociales y ambientales: en este módulo se traduce los resultados biofísicos de las simulaciones vinculadas con los impactos sociales y ambientales. Su objetivo es ambientar, para cada simulación, las repercusiones para la sociedad humana en términos de bienestar e impactos ambientales (Capellán Pérez, y otros, 2020).

Debido a que el objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es evaluar monetariamente el impacto de los eventos climáticos extremos, se trabajará sobre los módulos de economía y de clima/emisiones. De esta manera, se estimará los daños en un cierto número de sectores económicos y se analizarán qué consecuencias económicas globales generan.

Como se dijo anteriormente, el módulo de economía es determinado por la demanda, la estructura económica y por limitaciones como la disponibilidad de energía. La estructura económica está desagregada en 35 sectores, los cuales están extraídos de la base de datos WIOD. Esta última fue elegida debido a que es una base de datos pública y a que contiene información a nivel mundial (WIOD: World Input-Output Database, 2020). Estos son los 35 sectores:

Tabla 1. Los 35 sectores económicos de WIOD

1. Agricultura, caza, pesca y silvicultura	20. Comercio al por mayor, excepto vehículos y motocicletas
2. Minería y explotación	21. Comercio al por menor, excepto vehículos, motocicletas y reparación de artículos del hogar.
3. Comida, bebida y tabaco	22. Hoteles y restauración
4. Textil y producto textil	23. Transporte interior
5. Cuero y calzado	24. Transporte marítimo
6. Madera, productos de madera y corcho	25. Transporte aéreo
7. Pulpa, papel, imprenta y publicaciones	26. Actividades de apoyo al transporte. Actividad de agencias de viajes
8. Petróleo, refinería y combustible nuclear	27. Telecomunicaciones y servicios de mensajería
9. Productos químicos	28. Servicios financieros
10. Plásticos y gomas	29. Actividad real
11. Otros minerales no metálicos	30. Actividades de alquiler
12. Metales básicos y metal procesado	31. Administración pública y defensa
13. Maquinaria	32. Educación
14. Equipamiento eléctrico y óptico	33. Sanidad
15. Equipamiento de transporte	34. Otros servicios comunitarios, sociales y personales
16. Productos reciclados	35. Hogares privados con personal contratado
17. Suministro de electricidad, gas y agua	
18. Construcción	
19. Venta, reparación y mantenimiento de vehículos y motocicletas al por menor	

Fuente: (WIOD: World Input-Output Database, 2020)

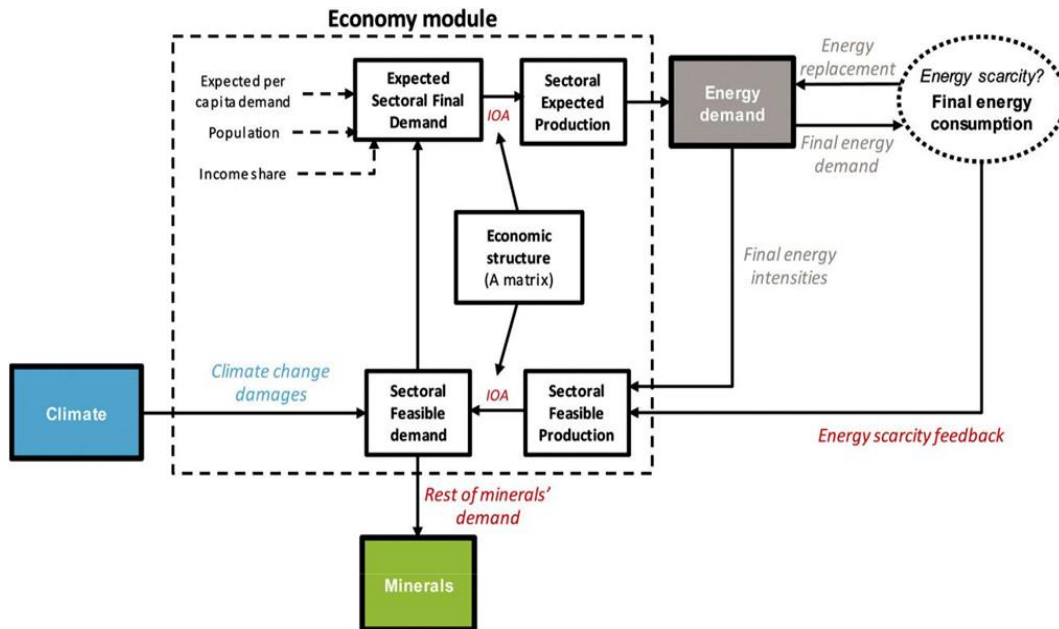
Recordando lo mencionado en el apartado REVISIÓN LITERARIA de este mismo documento, los sectores de agricultura, ganadería, pesca, energía, transporte y turismo son los más relevantes para este estudio debido a su vulnerabilidad a los impactos del cambio climático, sus altas aportaciones a las emisiones de GEI y sus influencias en la economía y bienestar de la sociedad. Por lo tanto, y también por razones de capacidad y envergadura de este trabajo, se centrará el análisis en los sectores del transporte terrestre, la agricultura y el de turismo.

Es relevante insistir en el hecho de que MEDEAS limita el crecimiento económico de su modelo con la escasez de recursos de energía. Dado que existe una fuerte relación entre las emisiones y el consumo de energía, cualquier evaluación de la capacidad de la economía para cumplir los objetivos climáticos requiere de fuertes modelos² de Energía, Economía y Medio Ambiente (EEE), dentro de los IAM. Pero, sin embargo, el concepto de límites rara vez es considerado por los encargados de formular políticas o los IAM, por lo que MEDEAS destaca al incorporar esta importante novedad. El proceso económico degrada la cantidad y calidad de los recursos energéticos y, por lo tanto, el crecimiento económico, o incluso el estado estacionario, están

² Se define como modelo fuerte a todo aquel cuyas variables presentan una notable correlación entre ellas.

limitados por la disponibilidad de energía (Nieto, Carpintero, Miguel, & de Blas, 2020).

Figura 2. Visión esquemática del módulo de Economía en MEDEAS



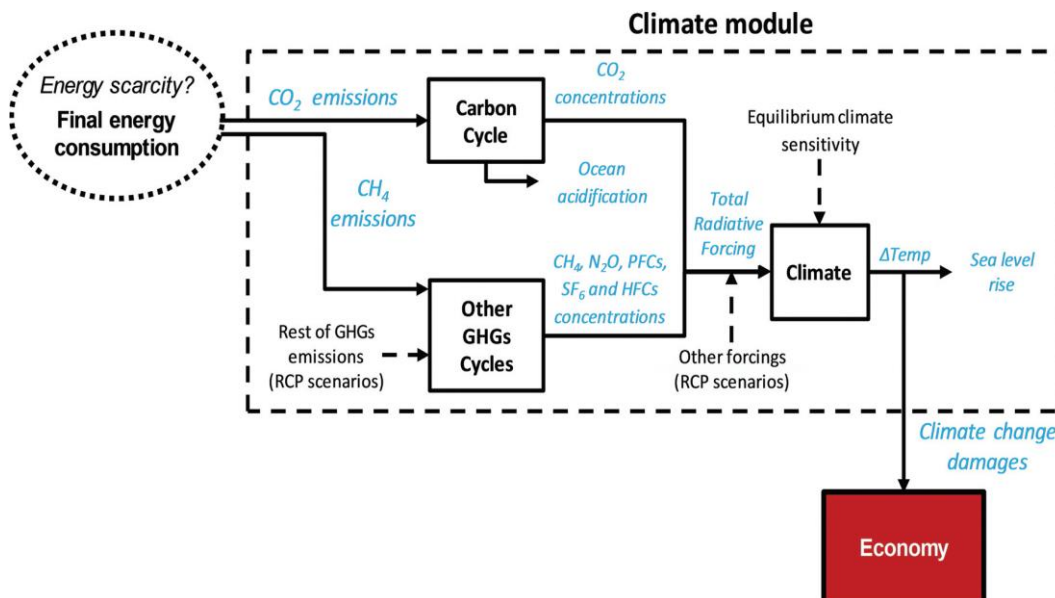
Fuente: (Capellán Pérez, y otros, 2020)

El módulo de economía reproduce las interdependencias entre la economía y el medio ambiente. Esto se aprecia en la Figura 2. La producción de bienes y servicios depende, a lo largo del tiempo, de los cambios de la demanda agregada, la cual, a su vez, se basa al inicio en la variación de la población, el PIB y la distribución de ingresos. Los cambios en la demanda esperada proporcionan los requisitos de producción sectorial esperados, que están determinados por el análisis input-output (IOA). Después, la producción sectorial factible se estima con la energía final más limitante, a la vez que se tienen en consideración las intensidades de energía sectoriales. Esta decisión se justifica por la alta sensibilidad de la economía mundial a los recursos energéticos clave, especialmente el petróleo. De esta manera, la demanda monetaria final factible, que coincide con el PIB a nivel mundial, se amolda a la disponibilidad de energía final determinada en el módulo de energía. La versión del modelo establece por defecto que la escasez de energía afecta de manera equitativa a todos los sectores, aunque esto se puede modificar (Capellán Pérez, y otros, 2020).

También se puede observar que los daños del cambio climático afectan directamente a la demanda monetaria factible o, lo que es lo mismo, al PIB mundial. Esta relación de influencia es en la que se va a enfocar este trabajo para poder evaluar el impacto económico de los eventos climáticos extremos.

En la Figura 3 que se muestra a continuación se representa, de manera simplificada, la estructura del módulo clima:

Figura 3. Visión general del módulo Clima de MEDEAS



Fuente: (Capellán Pérez, y otros, 2020)

En primer lugar, se observa que las emisiones de CO₂ entran en el ciclo del carbono estimando el nivel de concentración de este gas en la atmósfera. Las emisiones son producidas por causa del consumo de energía y de los cambios en el uso de la tierra. El ciclo del carbono refleja la dinámica entre el carbono en la atmósfera, la biosfera (humus y biomasa) y el océano, incluidas las retroalimentaciones de temperatura. En segundo lugar, se encuentran las emisiones del resto de los GEI, los cuales son, a excepción del CH₄, variables exógenas. Posteriormente, el calentamiento instantáneo de todos los GEI, o forzamiento radiactivo total, se agrega a través de sus respectivos coeficientes de forzamiento radiactivo, lo que posibilita calcular el aumento promedio de la temperatura global con relación a los niveles preindustriales. Esa variación de la temperatura es la que produce los daños del cambio climático al módulo de economía. También se calculan otros impactos climáticos, como son la acidificación de los océanos y la variación del nivel del mar (Capellán Pérez, y otros, 2020).

Evidentemente, la cantidad de emisiones generadas y, con ello, el aumento de temperatura provocado y los daños climáticos derivados, varían en función del escenario en el que se desarrolla el modelo. Estos últimos pueden ser tres según (Nieto, Carpintero, Miguel, & de Blas, 2020). El primero de ellos es Business as Usual (BAU), en el cual no hay políticas adicionales de transición y se mantienen las tendencias actuales (+4-5°C al final de siglo). El segundo es

el Crecimiento Verde (GG), en el que se ejecuta la transición de bajo carbono según el Acuerdo de París (+1.5-2°C al final de siglo) y su conjunto de políticas y estándares de crecimiento del PIB. El tercero y último es el escenario de Post-Crecimiento (PG), dentro del cual se prueba la transición hacia la sostenibilidad bajo un PIB de no crecimiento o de decrecimiento (se consigue un aumento de temperatura menor que en el GG). Como se puede intuir, el desarrollo económico sigue caminos distintos en cada uno de ellos.

El modelado de los impactos climáticos representa un desafío debido a las incertidumbres y a la naturaleza heterogénea de los daños climáticos según regiones, sectores y generaciones. Además, los IAM muestran unos impactos y daños insignificantes en los humanos para altas subidas de temperatura. Por lo tanto, se ha desarrollado una nueva metodología, fundamentada en el concepto de DF, para incluir daños climáticos en MEDEAS-World. Esta incluye una representación consistente de los impactos con evaluaciones climáticas realizadas por científicos naturales, las cuales se aplican mediante un enfoque inductivo de arriba hacia abajo para la calibración de la DF a través de la interpretación informada del “cambio climático peligroso”. Los impactos climáticos afectan los impulsores del crecimiento (o las tasas de crecimiento) y no solo el nivel de producción (Capellán Pérez, y otros, 2020).

Existen dos opciones para el usuario en MEDEAS-World:

- 1) Una función de pérdida de energía que disminuye el consumo final de energía disponible para la producción después de los impactos del cambio climático (en función del nivel de las concentraciones de CO₂).
- 2) Una función de daño monetario que enlaza la variación promedio de la temperatura con la pérdida de PIB per cápita debido a los daños del cambio climático (Capellán Pérez, y otros, 2020).

A niveles bajos de cambio climático los impactos son insignificantes, mientras que para altos niveles de variación de la temperatura los daños son catastróficos. Se utilizan funciones no lineales para reproducir esta no linealidad entre el cambio climático y sus impactos asociados. El usuario también puede efectuar ejecuciones omitiendo estos daños (Capellán Pérez, y otros, 2020).

4. METODOLOGÍA INPUT-OUTPUT

En el año 1941, Vasily W. Leontief presentó *The Structure of the American Economy 1919-1939*, obra en la cual expuso el análisis por matrices input-output. Leontief desarrolló y profundizó este método para explicar los flujos de mercancías dentro de una economía y los vínculos entre las demandas finales y las distintas producciones requeridas para complacerlas. Con ello, se puede observar y analizar las interacciones entre los diferentes sectores económicos (Ramírez, 1992).

La contabilidad nacional y los flujos de bienes y servicios que hay entre los distintos sectores económicos de un país constituyen las cuentas económicas de ese territorio (Tarancón Morán, 2003). Ambos términos están muy vinculados, ya que la contabilidad hace referencia a la imagen cuantitativa de la actividad económica de una nación que, al mismo tiempo, está constituida por una gran variedad de flujos de intercambio tanto en el propio país como fuera de él.

Las tablas input-output, también llamadas matrices insumo-producto, son una importante herramienta que facilita la organización y el análisis de las relaciones intersectoriales. Su principal finalidad es la de poder expresar el tamaño de los flujos interindustriales de acuerdo con los niveles de producción de cada sector (Cervini Iturre, 2002). En consecuencia, todas las transacciones de bienes y servicios ejecutadas en un lapso de tiempo concreto en un país quedan inscritas en la matriz input-output.

4.1. Elementos de la economía intersectorial y desarrollo de la matriz input-output

Dentro de cada uno de los componentes de un sistema económico se pueden determinar tres grandes bloques de bienes o servicios:

- 1) Recursos externos: son definidos como los recursos económicos realizados fuera del sistema de estudio. Las tierras o los recursos humanos son ejemplos de ellos. También forman parte de este grupo los bienes recibidos por importación.
- 2) Recursos parcialmente empleados: su peculiaridad más relevante es que no son consumidos en su totalidad durante el transcurso de la producción.
- 3) Insumos intermedios: los cuales son precisados como aquellos bienes elaborados a partir de factores (capital o trabajo) que son empleados a su vez en la producción de nuevos bienes (Cervini Iturre, 2002). Están fuertemente relacionados con el valor añadido. Para explicarlo mejor, se pone el ejemplo de la madera. Ésta puede ser un bien final si es empleada como leña en las hogueras. Sin embargo, es un bien

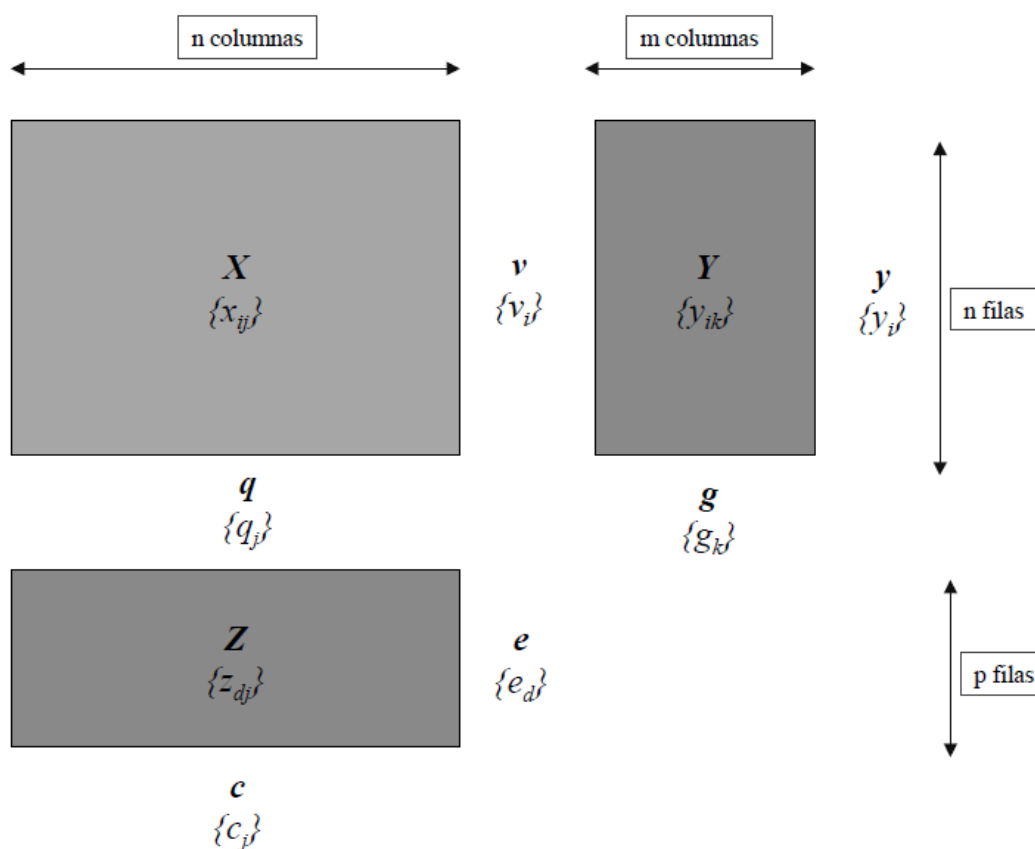
intermedio para las fábricas de muebles, ya que el producto último son los muebles y el bien final el dinero obtenido por su venta.

Tanto a los recursos parcialmente utilizados como a los recursos externos se les denomina insumos primarios o factores productivos. La obligación de emplearlos para elaborar los bienes finales conlleva a la realidad de las transacciones entre los diversos sectores económicos.

Los flujos de bienes y servicios entre los distintos sectores que recogen las tablas input-output pueden venir expresados en unidades físicas. Sin embargo, lo más habitual es emplear unidades de valor para conseguir una mejor homogeneización entre las ramas productivas y facilitar, así, la obtención de diferentes aplicaciones (Tarancón Morán, 2003).

De manera característica, una tabla input-output de un sistema económico está constituida por tres matrices de valores (ver en Gráfico 1). Éstas son la matriz de compras y ventas intermedias (matriz X de nxn), la matriz de demanda final para m componentes (matriz Y de nxm) y la matriz de inputs primarios para p componentes (matriz Z de pxn).

Gráfico 1. Matrices que componen una tabla input-output



Fuente: (Tarancón Morán, 2003)

La matriz X recoge los intercambios de producciones intermedias entre los distintos sectores económicos. En cada una de sus filas se muestran las ventas (outputs) que cada sector realiza al resto y a sí mismo (intraconsumos). Por otra parte, en las columnas se detallan las compras que cada sector realiza al resto y a sí mismo (intraconsumos). Cada uno de los elementos típicos (X_{ij}) de esta matriz informa de las compras realizadas por el sector j -ésimo del bien producido por el sector i -ésimo. En última instancia, se definen un vector v ($n \times 1$) para los outputs totales intermedios, y un vector q ($1 \times n$) para reflejar la suma de compras intermedias.

La matriz Y refleja las transacciones (ventas) de los n sectores económicos con las m componentes de la demanda final. El número de componentes de la demanda final puede variar en función del estudio que se quiera realizar y de los datos que se posea. Algunos de ellos pueden ser el consumo (público y privado) o el total de exportaciones de cada sector. Una columna que es necesario que aparezca en cualquier estudio con matrices input-output es la de demanda total. Esta columna representa la suma de cada uno de los n intercambios que realiza un sector.

La matriz Z muestra las compras de inputs por parte de los sectores a los factores productivos primarios. Por tanto, no son las compras a otros sectores. Estos factores productivos primarios están desagregados en componentes como la retribución de los asalariados o las cargas sociales de la empresa, los cuales suelen ser componentes del valor añadido. Esta matriz posee un comportamiento similar al de la Y , ya que se tratan de matrices de totales, aunque una es de compras y la otra de ventas, respectivamente. Por este motivo, el número de filas (p) variará dependiendo del estudio y de los datos que se tengan (Tarancón Morán, 2003).

Para ver un caso real de lo dicho hasta ahora, se puede observar la Tabla 17 en el ANEXO 1. TABLAS Y GRÁFICOS de este documento. Estas tres tablas representan la matriz input-output de España del año 2016. En la primera de ellas se muestran las transacciones que ha habido durante ese periodo desde los sectores económicos de salida (filas) hacia los sectores económicos de llegada (columnas). Por lo tanto, ésta se corresponde con la matriz X antes explicada. El total de los sectores realmente representados es de 64, aunque se han seleccionado solamente los 20 primeros para que los datos fueran más legibles, de ahí que la dimensión de la matriz sea de 20×20 . Obviamente, cuanto mayor sea el número de sectores representados, mayor será la precisión de los datos que se tengan en ella. Para los países entre los cuales existan relaciones de comercialización entre diferentes sectores económicos, existirá una tabla similar a esta que relacionará las ventas que realiza un país a otro.

La segunda tabla es la equivalente a la matriz Y antes mencionada. Como se dijo, n es igual a 64, es decir, igual al número de sectores, aunque hemos seleccionado sólo los 20 primeros por los mismos motivos que antes. El valor de m varía en función de lo que se quiera analizar y, en este caso, es igual a 11. Algunos de estos componentes de la demanda final son el total de gasto en el consumo final o la formación bruta de capital. Además, se observa que, efectivamente, existe una columna en la que se representa la demanda total. De esta manera, se puede comparar, para cada sector, el valor de las exportaciones con respecto a la demanda intersectorial, por ejemplo.

La tercera y última tabla se corresponde con la matriz Z. Al igual que en los casos anteriores, n es igual al número de sectores y p varía en función del estudio. Se representan solamente 4 sectores por cuestiones de comprensibilidad. Se puede ver que algunos de los desagregados de los factores productivos primarios son la remuneración de los asalariados o el excedente de explotación.

Llegados a este punto, se muestra, en la Tabla 2, la desagregación de la matriz input-output:

Tabla 2. Tabla input-output general

Purchases by:	Intermediate Users Sectors/Industries					Final Demands				Total Demand	
	1	2	3	...	n	C	I	G	E	X	
Sales by:	1	X_{11}	X_{12}	X_{13}	...	X_{1n}	C_1	I_1	G_1	E_1	X_1
	2	X_{21}	X_{22}	X_{23}	...	X_{2n}	C_2	I_2	G_2	E_2	X_2
	3	X_{31}	X_{32}	X_{33}	...	X_{3n}	C_3	I_3	G_3	E_3	X_3
Sectors/ Industries	.	.	.	.	...	.	.	.	.	.	?
	?
	n	X_{n1}	X_{n2}	X_{n3}		X_{nn}	C_n	I_n	G_n	E_n	X_n
Value- Added	W	W_1	W_2	W_3	...	W_n	W_C		W_G		W
	R	R_1	R_2	R_3	...	R_n					R
Imports	M	M_1	M_2	M_3	...	M_n	M_C	M_I	M_G		M
Total Supply	X	X_1	X_2	X_3	...	X_n	C	I	G	E	

Fuente: (TANAKA, 2011)

En donde:

X_i = cantidad total de producción del sector i (i=1 ... n).

X_{ij} = ventas desde el sector i hacia el sector j, o valor de las entradas del sector i utilizadas para producir la salida del sector j (i=1 ... n; j=1 ... n).

W_j = salarios en el sector j (j=1 ... n). Reproduce el empleo de la mano de obra en la elaboración del producto i.

R_j = Intereses y beneficios en el sector j .

M_j = Importaciones del sector j .

C_j = Consumo personal de la producción del sector i .

I_j = Desembolso en inversión para la producción en el sector i .

G_j = Compra por parte del gobierno de la producción del sector i .

E_j = Exportaciones de la producción del sector i .

M_C , M_I y M_G = importaciones de bienes finales (por consumidores, empresas y gobierno respectivamente).

En el caso de los X_{ij} , es decir, cuando coexisten dos subíndices, se representa una transacción intersectorial. El primer subíndice (i) indica el sector de origen y el segundo (j) se corresponde con el de llegada (TANAKA, 2011).

De esta manera, se puede escribir la demanda total de la producción como:

$$X_{ij} = \sum_{j=1}^n X_{ij} + F_i$$

En donde:

$$F_i = C_i + I_i + G_i + E_i$$

El sumatorio de los X_{ij} refleja el total de las ventas del sector i al resto de los sectores. La totalidad de la demanda de la producción del sector i se representa con F_i . Como existen n sectores, hay n ecuaciones iguales a la anterior, una por cada uno de los mismos.

Trabajando con las filas inferiores de la matriz obtenemos:

$$W = \sum_{j=1}^n W_j + (W_C + W_G)$$

$$R = \sum_{j=1}^n R_j$$

$$M = \sum_{j=1}^n M_j + (M_C + M_I + M_G)$$

El valor total de las importaciones dentro de la economía se formula en esta última ecuación mostrada. A continuación, observamos la fila de la producción total, en la cual la producción bruta total de la economía (X_j) se expresa como:

$$X_j = \sum_{i=1}^n X_{ij} + M_j + R_j + W_j$$

Por definición, la demanda total de la producción para cualquier sector ha de ser pareja al valor total suministrado.

Por último, en el cuadro inferior derecho de la matriz se encuentran los valores finales de las demandas desagregadas:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i + W_C + M_C$$

$$I = \sum_{i=1}^n I_i + M_i$$

$$X_j = \sum_{i=1}^n G_i + M_G + W_G$$

$$E = \sum_{i=1}^n E_i$$

De esta manera, la matriz input-output puede quedar especificada matemáticamente como un grupo de ecuaciones que tienen que satisfacerse mutuamente para compensar las demandas final o intermedia de los bienes o servicios. Se puede definir la asignación de producción del sector k como sigue (TANAKA, 2011):

$$X_k = \sum_{j=1}^n X_{kj} + F_k = \sum_{j=1}^n X_{ik} + W_k + R_k + M_k \quad (k = 1 \dots n)$$

Donde:

$$F_k = C_k + I_k + G_k + E_k$$

4.2. El coeficiente técnico de la matriz input-output

Dentro del trabajo que se realiza en las matrices input-output, una hipótesis esencial es que los flujos intersectoriales desde un sector i a otro j se realizan en un periodo determinado, como por ejemplo un año. Sabiendo esto, se define un nuevo término $a_{ij} = X_{ij}/X_j$, el cual se designa como el coeficiente técnico de la matriz input-output. Se puede definir como la cantidad demandada por el sector i para producir una unidad en j. Por definición, se sabe que:

$$X_{ij} = a_{ij} * X_j \quad (1.1)$$

Como se comentó en el subapartado 4.1 de este documento, el valor de la producción total del sector j puede escribirse como:

$$X_j = \sum_{i=1}^n X_{ij} + W_j + R_j + M_j \quad (j = 1 \dots n) \quad (1.2)$$

Si ahora se divide la expresión anterior entre el valor de la producción del sector j, X_j , se obtiene:

$$1 = \sum_{i=1}^n \frac{X_{ij}}{X_j} + \frac{W_j}{X_j} + \frac{R_j}{X_j} + \frac{M_j}{X_j} \quad (1.3)$$

El coeficiente técnico de la matriz input-output, el cual pertenece al intervalo [0,1], muestra la proporción de la producción del sector j explicada por los insumos del sector i. Introduciendo $a_{ij} = X_{ij}/X_j$ en la ecuación (1.3), se consigue:

$$1 = \sum_{i=1}^n a_{ij} + \frac{W_j}{X_j} + \frac{R_j}{X_j} + \frac{M_j}{X_j} \quad (1.4)$$

Además, se sabe que la totalidad de la demanda de la producción del sector i se define como:

$$X_i = \sum_{j=1}^n X_{ij} + F_i \quad (i = 1 \dots n) \quad (1.5)$$

Si ahora se sustituye $X_{ij} = a_{ij} \cdot X_j$ en la ecuación anterior, se obtiene:

$$X_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j + F_i \quad (i = 1 \dots n) \quad (1.6)$$

Si a la expresión anterior (1.6) se la expande para cada sector i , se consigue como resultado:

$$\begin{array}{ll} i = 1 & X_1 = a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n + F_1 \\ i = 2 & X_2 = a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2n}X_n + F_2 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ i = n & X_n = a_{n1}X_1 + a_{n2}X_2 + \dots + a_{nn}X_n + F_n \end{array}$$

Por lo que, de esta manera, se lograría una ecuación para cada uno de los sectores (TANAKA, 2011).

4.3. La matriz inversa de Leontief

Se parte de la expresión:

$$x = Ax + f$$

en la que, como se vio en el apartado anterior, $A = [a_{ij}]$ es la matriz de los coeficientes técnicos, con $a_{ij} = \frac{z_{ij}}{x_j}$, y f representa la demanda final. Ahora, suponiendo que $(I - A)$ no es singular e introduciendo el modelo de input-output inverso de Leontief (o matriz de requisitos totales) $L = (I - A)^{-1}$, se tiene el modelo de input-output impulsado por la demanda estándar de Leontief:

$$X = Lf \quad (1.7)$$

El teorema de Hawkins-Simons garantiza que existe $x \geq 0$ si y solo si todos los principales menores de $(I - A)$ son positivos.

Se observa que se puede expresar la matriz de Leontief como $L = \sum_{i=0}^{\infty} A^i$, donde cada término A^i captura dependencias a diferentes niveles de profundidad, empezando desde la demanda final y continuando con la demanda interna hasta las cadenas de suministro.

El modelo obtenido es lineal y se conoce como abierto, ya que, en su uso operativo, f se considera una variable completamente exógena. Deben tenerse en cuenta dos aspectos relevantes de la representación, en particular:

- El modelo se basa en la demanda, ya que conduce a definir los niveles de producción necesarios para cada industria a través de la propagación

hacia atrás, a partir de valores de demanda final asignados exógenamente. Además, asume una elasticidad infinita de la oferta con respecto a la demanda, descuidando las posibles limitaciones de la capacidad de oferta.

- La representación asume coeficientes técnicos (de entrada) fijos, es decir, que cada sector requiere una cantidad fija de cada entrada para producir una de salida (Galbusera & Giannopoulos, 2018).

4.4. Valoración de los impactos de los desastres naturales con la metodología input-output

Hasta la década de los 80, los desastres naturales y sus impactos económicos y efectos sobre la sociedad no habían sido tenidos en cuenta para los investigadores. Después, una serie de catástrofes a gran escala hizo entender que es importante comprenderles y prepararnos ante ellos. Además, demostraron cuánto de vulnerables son las sociedades modernas ante estas catástrofes naturales (OKUYAMA, 2008). Muchos enfoques empleados para la estimación de los daños totales causados por el cambio climático se centran en indicadores físicos y biofísicos, como puede ser el rendimiento de los cultivos, ignorando en gran parte los notorios impactos de los fenómenos extremos (Schewe, y otros, 2019).

Cabe destacar que el número de informes de los desastres naturales, así como el total de sus pérdidas, han aumentado dramáticamente en el último siglo. De hecho, esta tendencia no ha cambiado (Luigi Ratti, 2017). Algunos investigadores alegan que este incremento se debe a motivos puramente naturales mientras que otros culpan al cambio climático por ello. De todos modos, a pesar de esta brecha entre los autores, queda claro que este incremento de frecuencia y de daños aumenta la vulnerabilidad de la sociedad y de la economía ante estas catástrofes (Hallegatte, A Roadmap to Assess the Economic Cost of Climate Change with an Application to Hurricanes in the United States, 2008). Es importante resaltar que estas observaciones están sujetas a una alta variabilidad regional. Por ejemplo, en unas zonas aumentan las precipitaciones originando inundaciones, mientras que en otras disminuyen provocando sequías. Esto hace difícil poder estimar con precisión los impactos económicos futuros de los desastres naturales (Unterberger, 2018), como se verá más adelante.

Antes de continuar, se hace necesario definir bien lo que se entiende por desastre natural para saber con claridad lo que la estimación de los impactos debe cubrir. Según (OKUYAMA, 2008), en la literatura se ha estado utilizando indistintamente los términos de catástrofe, peligro, evento no programado o caso catastrófico, cuando no todos los desastres conducen a consecuencias catastróficas ni todos son eventos no programados. Por lo tanto, se entiende

peligro como la aparición de un evento físico, y se define como desastre las consecuencias derivadas del mismo. Para (Luigi Ratti, 2017), las definiciones generales son vagas en lo que respecta al tamaño y el tipo de pérdidas de un desastre. Sin embargo, lo que determina un desastre es que la vida rutinaria de una comunidad se rompa y los recursos locales no son suficientes para la respuesta y la recuperación. A la hora de distinguir un desastre de una catástrofe, define a esta última como un evento que se cree que tiene una muy baja probabilidad de que se materialice, pero que si lo hace producirá un daño tan grande y repentino que le hará ser discontinuo con el flujo de los acontecimientos que la precedieron. Es decir, una catástrofe es un desastre tal que volver a la situación socioeconómica y ambiental anterior se hace imposible.

A la hora de estimar la totalidad de los daños que un desastre natural puede causar, se hace imprescindible tener en cuenta tanto los costes directos como los indirectos. Los primeros hacen referencia al costo de reparación o de reemplazo, con los niveles de precios preventa, de los activos que han sido dañados o destruidos. Estos son calculados de forma rutinaria por las compañías de seguros tras cada desastre. Los costes indirectos son la reducción de la producción de bienes y servicios, como pueden ser la interrupción del negocio en las secuelas del desastre o las pérdidas de producción durante el período de reconstrucción. Por ejemplo, si una fábrica valorada en 1 millón de euros es destruida y reconstruida inmediatamente, la pérdida total es de 1 millón de euros. Sin embargo, si la reconstrucción se retrasa un año, las pérdidas totales son la suma del coste de reconstrucción (coste directo) y del valor de producción de un año (coste indirecto) (Hallegatte, *An Adaptive Regional Input-Output Model and its Application to the Assessment of the Economic Cost of Katrina*, 2008).

Estimar de forma precisa los costos indirectos de un desastre sigue siendo un desafío hasta el momento, teniendo en cuenta la complejidad de muchos entornos económicos, la naturaleza diversa de las contingencias del desastre, las limitaciones de datos y las restricciones intrínsecas a las herramientas analíticas en uso (Galbusera & Giannopoulos, 2018). Por ejemplo, en el caso de las inundaciones, la falta de pérdidas físicas observables para activos y capital lleva a la subestimación. Además, las grandes cantidades de agua de lluvia pueden conducir a deslizamientos de tierra que, a la larga, ocasionarían daños a las edificaciones (Jenkins, 2013).

Se hace necesario elaborar un modelo multirregional y multisectorial para poder evaluar los efectos indirectos que estos impactos tienen en el resto de la economía y en las economías de otros países no afectados directamente (Dellink, Lanzi, & Chateau, 2019). De esta manera, entran en juego los efectos cascada que estos desastres generan en el interior de un sistema

multindustria, provocando ondulaciones positivas y negativas a lo largo de cada uno de estos sectores (Galbusera & Giannopoulos, 2018). A modo representativo, se imagina una industria que produce un tipo de producto demandado por industrias de otros sectores. Sus instalaciones son dañadas por un desastre natural y tiene que dejar de fabricar. Esto ocasiona que las industrias cliente de esta no puedan continuar con su trabajo por la falta de este producto. Por lo tanto, de manera sucesiva, se genera un efecto rebote que termina por afectar de manera significativa al sistema económico. Estas empresas, además, terminan despidiendo a un número de trabajadores que, tras esto, no podrán consumir otros bienes que antes sí que adquirirían por la falta de ingresos.

Quizás, el marco de modelado más utilizado para estimar estos efectos indirectos es el input-output. Su popularidad se debe a su capacidad de reflejar las interdependencias económicas dentro de una economía y, también, a su sencillez. Pero también cuenta con una serie de debilidades, como pueden ser su estructura lineal, sus coeficientes rígidos, su falta de restricción a la capacidad de suministro y su nula respuesta a la variación de los precios (OKUYAMA, 2008).

Dentro de un modelo input-output, un desastre natural puede ser visto como un choque exógeno que reduce los insumos disponibles, que normalmente desembocan en variaciones en los patrones de producción y de consumo. Además, la escala temporal considerada en estos modelos juega un papel clave. A corto plazo, el sistema de producción puede considerarse fijo, ya que lleva tiempo reemplazar la maquinaria, construir nuevas fábricas, capacitar a la nueva mano de obra, etc. Por lo tanto, la capacidad de producción local está muy limitada y solamente las importaciones de fuera de la región afectada pueden proporcionar algo de flexibilidad. Cabe destacar que estos enfoques de modelado también permiten una clara distinción entre los impactos directos y los indirectos (Luigi Ratti, 2017).

En el análisis de desastres, los modelos input-output son habitualmente catalogados como sobreestimadores de las pérdidas económicas, mientras que otros tipos de modelos, como pueden ser los CGE, son considerados como infraestimadores (Galbusera & Giannopoulos, 2018). Esto es así porque el enfoque input-output supone que el sistema económico es incapaz de realizar sustituciones cuando, en realidad, una empresa puede, por ejemplo, reducir parcialmente las pérdidas al sustituir los insumos habituales con otros que no se consideran adecuados para el proceso de producción en tiempos normales. Sin embargo, los modelos CGE son frecuentemente considerados como optimistas ya que suponen un sistema económico que puede ser más flexible de lo que es en realidad. De hecho, en un contexto de desastre, los recursos pueden no ser utilizados de manera óptima debido a diferentes limitaciones

contingentes (por ejemplo, puede darse que no haya suficiente mano de obra cualificada disponible). Por este motivo, se han ideado varios modelos intermedios para solventar estas deficiencias (Luigi Ratti, 2017).

En lo que al horizonte temporal se refiere, los modelos input-output son los preferidos para las estimaciones más a corto plazo, mientras que los modelos CGE lo son para las valoraciones a largo plazo. Por último, cabe resaltar que el enfoque input-output es el más indicado para los casos en los que existen un gran número de sectores (Galbusera & Giannopoulos, 2018).

5. JUSTIFICACIÓN DE LA ELECCIÓN DE LOS SECTORES A ESTUDIAR

Como ya se indicó en el epígrafe MODELO MEDEAS de este mismo documento, la estructura económica que se emplea en el modelo MEDEAS está desagregada en 35 sectores, los cuales están extraídos de la base de datos WIOD. Todos estos sectores se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3. Sectores económicos de la base de datos WIOD

1. Agricultura, caza, pesca y silvicultura	20. Comercio al por mayor, excepto vehículos y motocicletas
2. Minería y explotación	21. Comercio al por menor, excepto vehículos, motocicletas y reparación de artículos del hogar.
3. Comida, bebida y tabaco	22. Hoteles y restauración
4. Textil y producto textil	23. Transporte interior
5. Cuero y calzado	24. Transporte marítimo
6. Madera, productos de madera y corcho	25. Transporte aéreo
7. Pulpa, papel, imprenta y publicaciones	26. Actividades de apoyo al transporte. Actividad de agencias de viajes
8. Petróleo, refinería y combustible nuclear	27. Telecomunicaciones y servicios de mensajería
9. Productos químicos	28. Servicios financieros
10. Plásticos y gomas	29. Actividad real
11. Otros minerales no metálicos	30. Actividades de alquiler
12. Metales básicos y metal procesado	31. Administración pública y defensa
13. Maquinaria	32. Educación
14. Equipamiento eléctrico y óptico	33. Sanidad
15. Equipamiento de transporte	34. Otros servicios comunitarios, sociales y personales
16. Productos reciclados	35. Hogares privados con personal contratado
17. Suministro de electricidad, gas y agua	
18. Construcción	
19. Venta, reparación y mantenimiento de vehículos y motocicletas al por menor	

Fuente: (WIOD: World Input-Output Database, 2020)

Debido a la capacidad de extensión limitada que posee este trabajo, se eligen estudiar solamente los sectores del transporte terrestre (transporte interior), la agricultura (Agricultura, caza, pesca y silvicultura) y el de turismo (hoteles y restauración) de entre los 35 sectores de la base de datos WIOD. Se han examinado las distintas evaluaciones de la literatura de los daños provocados por los impactos del cambio climático en la producción de estos sectores. Para ello, dado el hecho de que el modelo de MEDEAS proporciona indicadores de cambio climático (variación de la temperatura media global, de la concentración de CO₂ en la atmósfera, acidificación de los océanos, etc.), se debe poder relacionar estas variables climáticas con las distintas valoraciones de los daños encontradas.

Antes de comenzar con la exposición del conjunto de estimaciones de daños halladas, se hace necesario justificar el por qué se han elegido estos sectores económicos y no otros. El primer y más importante aspecto que se ha tenido en cuenta en la decisión es el haber encontrado un número adecuado de estudios para poder tasar convenientemente los daños en la producción de los respectivos sectores. A partir de este primer criterio, se añaden otros motivos de peso que justifican la elección de trabajar con estos sectores económicos.

De manera general, uno de los sectores más relevantes es el de la energía ya que es crucial para satisfacer las necesidades humanas básicas y el bienestar general, además de ser clave para el desarrollo de la sociedad. También es importante recordar que sus actividades son fuentes de GEI y que, añadido a esto último, no es sencillo descarbonizar los servicios de energía hacia otros sectores dependientes de la misma.

Bastante relacionado con el sector de la energía está el del transporte, ya que éste debe consumir energía para poder realizar su actividad y, debido a esto último, produce un gran número de emisiones. Un ejemplo son los coches, los cuales son los principales emisores y, además, se espera que su número y uso crezcan debido al aumento de población y motorización. El sector del transporte es clave para el desarrollo económico y, al mismo tiempo, bastante vulnerable al cambio climático y sus eventos extremos. Por lo tanto, se hace importante adaptar bien sus infraestructuras y evitar, de esta manera, daños como los que las inundaciones ejercen al transporte por carretera.

El sector agrícola también es importante. Aporta alimento y es clave en muchas economías mientras que su rendimiento es vulnerable al cambio climático. Cuando existe una elevada concentración de CO₂ en la atmósfera el rendimiento del cultivo crece, pero este último disminuye si la temperatura aumenta o si las precipitaciones son escasas.

En última instancia se haya el sector del turismo, el cual es uno de los más importantes económicamente hablando. Es bastante sensible al cambio climático, ya que éste consigue provocar fuertes cambios en los flujos de personas que se generan debido a la actividad de este sector. Esto es así por el hecho de que los distintos tipos de actividades que buscan las personas para su tiempo de ocio tienen diversos requisitos climáticos, como se puede ver, por ejemplo, en los casos del turismo de playa o del turismo de invierno. Una de las situaciones que muestra claramente los daños directos que puede ejercer el cambio climático sobre este sector es la del aumento del nivel del mar, el cual golpea a las zonas costeras y destruye numerosos hoteles y zonas de recreo como las playas.

5.1. Agricultura

La agricultura, junto con la ganadería y la pesca, son sectores clave ya que nutren a la población. Además, en muchas economías del mundo que aún no están desarrolladas, se convierten en elementos claves económicamente hablando. Centrándonos ya en la agricultura en particular, se sabe que su producción no se destina únicamente a la alimentación, ya que muchos de sus productos se emplean para alimentar al ganado o para producir biogás, por ejemplo. Con esta información, se intuye que las disminuciones en el rendimiento agrícola pueden generar bastantes daños directos y, sobre todo, abundantes impactos indirectos por el efecto cascada hacia otros sectores. De esta manera, su repercusión en la economía global es relevante.

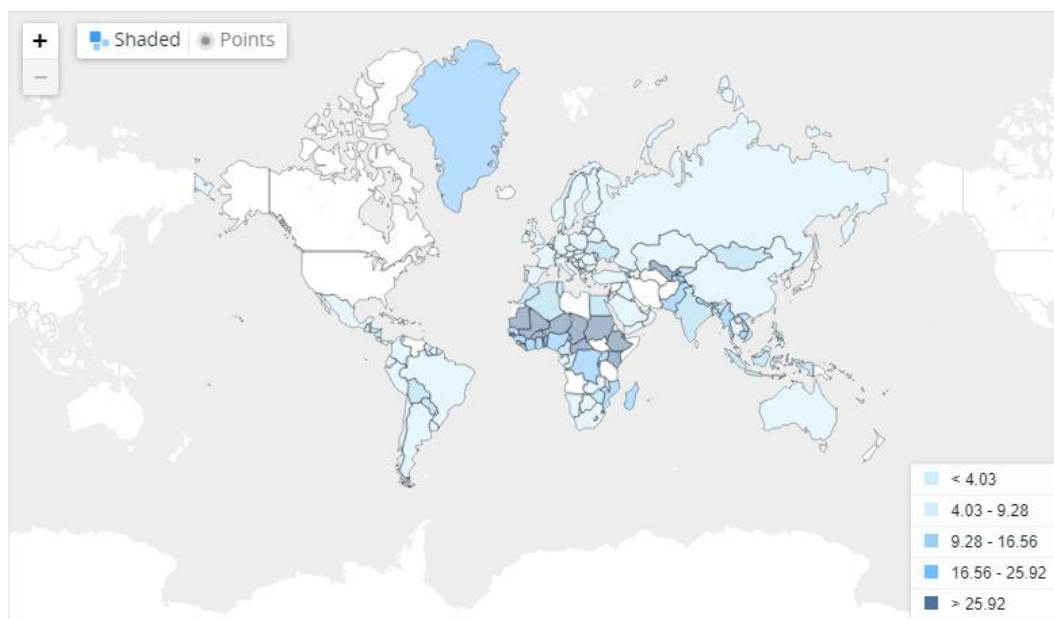
Como se puede leer en (Calzadilla, y otros, 2013), la agricultura es, con mucho, el mayor usuario mundial de recursos de agua dulce y, por este motivo, se convierte en un sector altamente vulnerable al cambio climático. La mayor variabilidad climática y las sequías afectarán la producción agrícola, ya que ésta está altamente influenciada por las precipitaciones y la temperatura. Las precipitaciones determinan tanto la disponibilidad de agua dulce como el nivel de humedad del suelo, los cuales son insumos críticos para el crecimiento de los cultivos. Una mayor cantidad de precipitaciones reducirá la brecha de rendimiento entre las agriculturas de secano y de regadío, pero también puede tener un impacto negativo si las lluvias extremas provocan inundaciones.

Por otro lado, la temperatura y la humedad del suelo determinan la duración de la temporada de crecimiento del cultivo. Las temperaturas más altas reducen el período de heladas, promoviendo el cultivo en tierras de clima frío. Pero por el contrario, en áreas áridas y semiáridas, estas temperaturas más elevadas reducirán el ciclo del cultivo y disminuirán sus rendimientos. Esta variabilidad climática, y en especial los cambios en los patrones de lluvia, es particularmente relevante para la agricultura de secano ya que su productividad depende del nivel de humedad del suelo (Calzadilla, y otros, 2013).

Como se ha visto, el cambio climático provoca que la distribución geográfica de las lluvias cambie y que la cantidad de precipitaciones disminuya en las zonas más áridas, a la vez que estas lluvias se aglutinan en períodos de tiempo más cortos provocando inundaciones. Junto a ello, la temperatura en estas mismas zonas aumenta, lo cual perjudica al sistema agrícola. Por desgracia, estas zonas más perjudicadas coinciden con las economías en desarrollo, las cuales dependen en gran cantidad de la producción de sus cultivos.

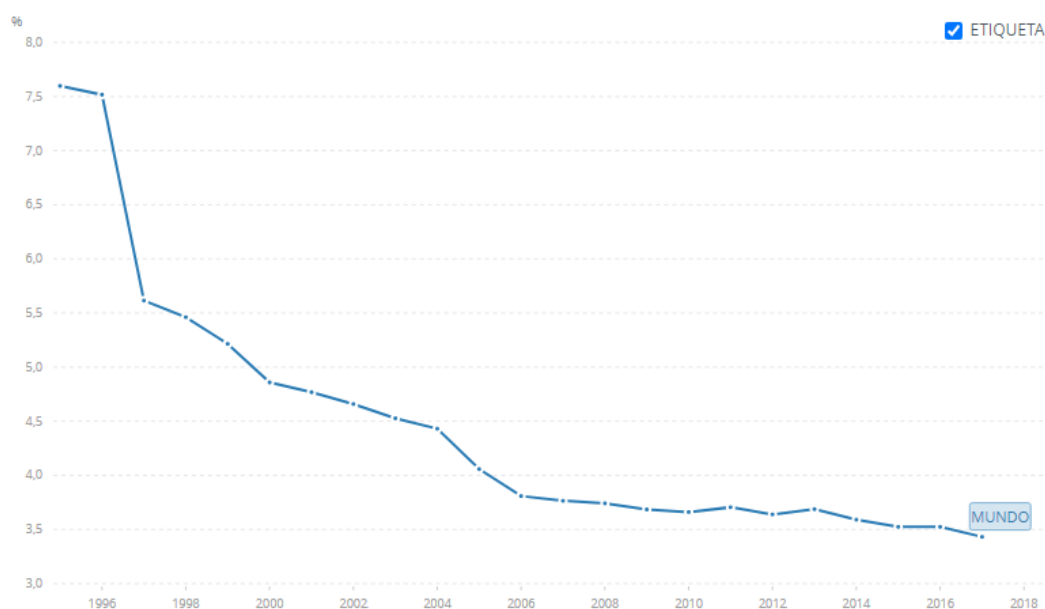
En los siguientes gráficos se observan los datos que nos ofrece el Banco Mundial sobre la participación de la agricultura en el PIB:

Gráfico 2. Mapa mundial de los % de la agricultura en los PIB nacionales (2018)



Fuente: (GRUPO BANCO MUNDIAL, 2019)

Gráfico 3. Evolución % de la agricultura en el PIB mundial (1995-2017)



Fuente: (GRUPO BANCO MUNDIAL, 2019)

En el Gráfico 2 se demuestra que, para los datos recopilados en el año 2018, la agricultura constituye un pilar básico para las economías consideradas menos desarrolladas, tal y como habíamos mencionado anteriormente. Mientras que para Burkina Faso equivale al 28% de su PIB, para un país

desarrollado como España representa tan sólo el 2.8%. En el Gráfico 3 se aprecia que el peso de este sector en el PIB mundial ha ido disminuyendo de manera fuerte desde 1995 hasta 2006, para luego mantenerse constante con leves descensos hasta nuestros días. Para el año 2017, ha supuesto el 3.43% (GRUPO BANCO MUNDIAL, 2019). Aun así, debido a que la población mundial sigue en aumento, y con ello su necesidad de alimento, y a que los recursos agrícolas tienen que ser compartidos con otros usos como la producción de biomasa, los impactos del cambio climático en el rendimiento de los cultivos puede aumentar el riesgo de hambre y afectar mucho a las economías débiles que dependen de este sector (Ren , y otros, 2018).

La producción agrícola es muy sensible a los efectos que produce el cambio climático. Mientras que un aumento de la temperatura media global desfavorece el crecimiento del cultivo, una mayor cantidad de CO₂ concentrado en la atmósfera beneficia la productividad de la planta. Pero el cambio climático también produce inundaciones, plagas y enfermedades, escasez de agua y/o calores extremos que igualmente perjudican el desarrollo de los cultivos (Ren , y otros, 2018). Por lo tanto, en cómputo global, el rendimiento de la agricultura se ve disminuido por la existencia de alteraciones medioambientales, lo cual conlleva a daños económicos y a pérdidas de bienestar social. De esta manera, se hace importante estudiar la actividad de este sector bajo distintos escenarios.

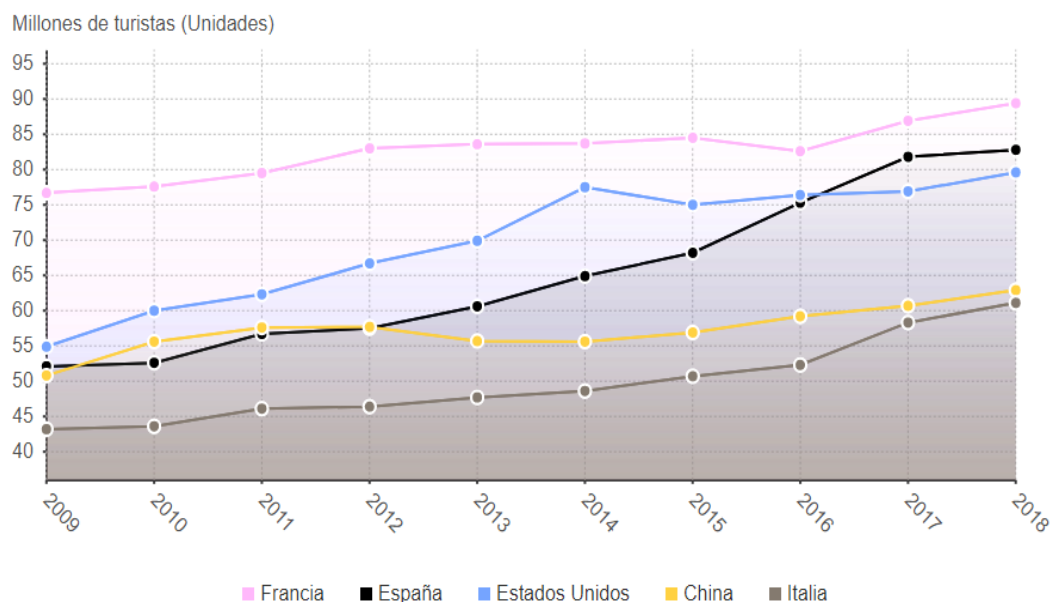
5.2. Turismo

Como se puede leer en (Du & Ng, 2018), la recreación y el turismo es una de las actividades económicas más grandes del mundo. Algunos, incluso, se atreven a afirmar que es la más grande de todas. En este estudio también se hace referencia a que varios investigadores han encontrado evidencias de que el turismo puede conducir al crecimiento económico.

Para reafirmar la importancia económica que tiene este sector, es importante comentar que en 2018 el turismo representó el 10,4% del PIB mundial con una aportación de 8,8 billones de dólares. Además, dio empleo en ese mismo año a unos 319 millones de personas en todo el mundo, lo que representa uno de cada diez trabajadores. Desde 2010, el turismo ha tenido un crecimiento más fuerte que la media de la economía con un desarrollo interanual del 3,9%. Todos estos datos destacan el papel de este sector como motor económico y de creación de empleo (Nexotur, 2019).

A continuación, se presentan unos datos y gráficos sobre el turismo en el mundo:

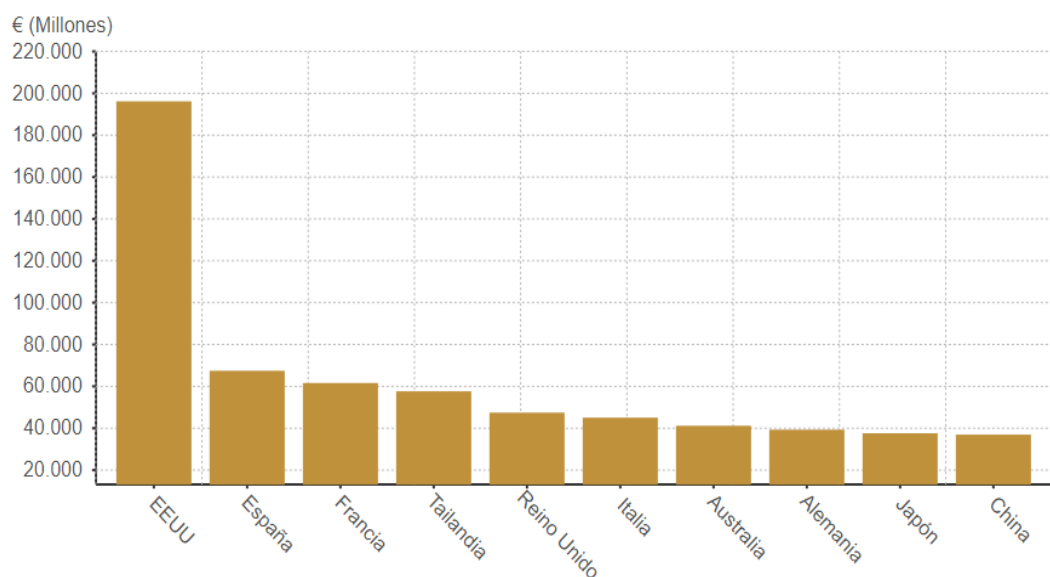
Gráfico 4. Evolución de la llegada de turistas en los países más visitados



Fuente: (Epdata, 2020)

En el Gráfico 4 se aprecia que el número de turistas que han recibido los cinco países más visitados del mundo ha crecido notablemente desde 2009. En el año 2019, según la Organización Mundial del Turismo (OMT), más de 1400 millones de personas viajaron por el mundo, creciendo esta cantidad un 9,7% con respecto a 2017 (Epdata, 2020).

Gráfico 5. Los diez países que más ingresos por turismo reciben (2019)



Fuente: (Epdata, 2020)

Como se puede apreciar en el Gráfico 5, la clasificación de los países que más cantidad de ingresos obtienen por parte de sus visitantes no coincide con la clasificación de los países que más turistas reciben. Estados Unidos es el país que más ingresos genera con la actividad de este sector, con unos 210000 millones de dólares (196000 millones de euros), cuando es el tercero en el ranking del número de visitantes recibidos. España le sigue de lejos con una facturación de 73000 millones de dólares (67000 millones de euros) y Francia, que es el país que cuenta con el mayor número de turistas, se coloca en la tercera posición con respecto a los ingresos (Epdata, 2020). Estos datos son bastante relevantes, porque lo que se busca es conseguir que la gente que te visite se gaste más dinero o se quede más número de días, no que te visiten muchas personas pero que luego te generen pocos ingresos.

El sector turístico es, también, vulnerable a los impactos que produce el cambio climático. Como se comenta en (Moore, Gomes, Alleyne, & Phillips, 2013), los cambios en el clima global pueden tener un impacto significativo en el turismo. Tanto es así, que hasta se puede argumentar que el clima es el principal aporte al producto turístico de una jurisdicción, ya que determina el tipo y la demanda de actividades turísticas, así como los costos operativos en términos de calefacción y/o refrigeración. Además de los impactos directos, la industria del turismo puede verse afectada por cambios ambientales indirectos como la falta de agua, la pérdida de biodiversidad, una mayor frecuencia e intensidad de los peligros naturales y/o mayores inundaciones costeras que dañan la infraestructura del litoral.

Debido a que el turismo es una pieza clave de la economía mundial, lo cual queda reflejado en su aportación al PIB global, en el número de personas a las que da trabajo y en su crecimiento interanual, y también a causa de que es un sector cuyas producción e infraestructura son vulnerables al cambio climático, se hace interesante el analizar su desempeño bajo diferentes escenarios climáticos y ver cómo esto influye en el bienestar y la riqueza generales de la sociedad.

5.3. Transporte terrestre

Las economías modernas se caracterizan por poseer un alto grado de división del trabajo y, por lo tanto, dependen de infraestructuras y servicios de transporte confiables para mantener los procesos de producción. La alta dependencia que estas economías tienen a los servicios del transporte ha hecho que el 23% de las emisiones globales de CO₂ sean debidas a la actividad de este sector. A la vez que sucede esto, el cambio climático ejerce múltiples impactos en el sistema de transporte. De manera particular, las infraestructuras de este sector terrestre (carreteras y vías férreas) se ven azotadas por fenómenos meteorológicos extremos, como por ejemplo las inundaciones (Bachner, 2017).

Como se puede leer en (MOLDTRANS GROUP , 2015), el transporte de mercancías es un buen indicativo de la capacidad económica de los países. Se pueden encontrar en el mundo economías potentes que se encuentran avaladas por un fuerte sector comercial del transporte internacional, las cuales representan a los principales países exportadores e importadores del comercio mundial. En 2015, estas naciones se encontraban ordenadas de la siguiente manera:

- **Primer puesto: Estados Unidos.** Este sector generaba en el país un volumen de 1.174.000 millones de dólares, estando especializado en el transporte de suministros industriales, de petróleo crudo, de equipos tecnológicos y de productos agrícolas como el maíz o la soja.
- **Segundo puesto: China.** Esta potencia asiática se dedica principalmente al transporte de mercancías como petróleo y combustibles, textiles, minerales, plásticos, químicos orgánicos, maquinaria eléctrica, juguetes y armas.
- **Tercer puesto: Alemania.** Las exportaciones de este país representaban el 50% de su PIB. Exporta a través del transporte terrestre con un camión cada vez más completo, y mediante el transporte marítimo con el uso de enormes contenedores. Sus productos principales son el gas, los vehículos, el petróleo, los metales y otros pertenecientes a las ramas alimentarias o farmacéuticas.
- **Cuarto puesto: Japón.** Se basa en el transporte marítimo y genera alrededor de 782.861 millones de dólares en exportaciones. Distribuye productos como petróleo, carbón, gas natural, ropa o aparatos auditivos y visuales.
- **Quinto puesto: Francia.** Sus exportaciones representaban, allá por 2015, el 27% de su PIB con un volumen de 513.567 millones de dólares. Distribuye productos como plásticos y productos químicos, maquinaria y equipos, vehículos, aviones, productos farmacéuticos, bebidas y elementos electrónicos (MOLDTRANS GROUP , 2015).

Como se puede observar, el transporte es una parte esencial en las economías desarrolladas y de él depende la actividad de otros muchos sectores. Por lo tanto, si los impactos del cambio climático golpean a la infraestructura del transporte provocando el bloqueo de su actividad, puede ocasionar que otras muchas actividades que dependen de él se vean interrumpidas. De esta manera, las repercusiones económicas que estos daños climáticos pueden acarrear son enormes.

Para reafirmar lo anteriormente dicho, en (Bachner, 2017) se dice que, dados los fuertes vínculos intersectoriales del transporte, el asunto de las repercusiones macroeconómicas (impactos directos e indirectos) de los

sistemas dañados e interrumpidos de este sector debe abordarse para poder desarrollar e implementar políticas climáticas (de adaptación) consistentes.

Debido a que existen tres modalidades de transporte (aérea, acuática y terrestre), y que todas ellas en su totalidad requerirían un análisis muy extenso, se ha decidido centrarse solamente en el transporte terrestre. Uno de los motivos en los se ha basado esta decisión es que las carreteras y las vías férreas son muy sensibles a eventos climáticos como las inundaciones. Además, los costos directos que sufren las infraestructuras del transporte terrestre se han encontrado más fáciles de estimar comparados con los de las otras dos modalidades.

6. DESARROLLO Y ANÁLISIS DE ECUACIONES PARA LA REPRESENTACIÓN DE LOS DAÑOS SECTORIALES

El objetivo último del presente TFG es la obtención de estimaciones de daños provocados por el cambio climático en varios sectores y, a través de ellas, observar cómo varía el PIB mundial bajo diferentes escenarios climáticos. Para ello, se deben integrar los impactos económicos, los cuales van a variar según el valor de diferentes variables indicadoras del nivel de cambio climático, como daños a la función de producción de cada sector.

6.1. Fuentes de datos utilizadas

Para conseguir que las estimaciones de daños sectoriales sean robustas y se ajusten lo más posible a la realidad, es necesario hacer una revisión de los resultados que se han obtenido en otros estudios al respecto. De este modo, se puede asegurar que los impactos climáticos que se van a integrar en el modelo no son resultado del azar, sino que siguen una tendencia de otros valores obtenidos por diferentes autores bajo distintos escenarios climáticos y empleando diversos modelos.

Al realizar la búsqueda de estimaciones de los daños que el cambio climático ejerce sobre los tres sectores que se analizan en este trabajo, se encuentran evaluaciones de distinto tipo, lo cual hace pensar que se debe tener muy claro qué tipo de valor se busca y las condiciones bajo las cuales este ha sido obtenido. Por ejemplo, para el sector agrícola se encontró un estudio para el continente africano (Mendelsohn, Dinar, & Dalfelt, 2000). En él se hallan estimaciones del impacto del cambio climático en billones de dólares para el año 2100 bajo tres contextos distintos de cambio climático: pesimista, moderado y optimista. Además, estas evaluaciones se realizan en función de las variaciones de temperatura y de lluvias. Pero estos valores no nos resultan útiles para nuestro análisis, ya que sólo se refiere a un único continente cuando nuestro objetivo es ver el porcentaje de daños en el sector a nivel mundial, y también porque resulta imposible obtener el tanto por ciento de la producción económica total que se pierde debido al cambio climático.

Caso similar ocurre con (Van Passel, Massetti, & Mendelsohn, 2017), el cual es un análisis *Ricardino* a escala europea de 15 países que combina el clima, el suelo, la geografía y las variables socioeconómicas para estimar los daños bajo tres escenarios distintos. Además de ser solamente un estudio a nivel europeo, apenas calcula cuánto se devalúa el precio de la tierra agrícola, lo cual es un dato alejado del porcentaje de producción económica perdida que se busca.

Ya como modelos a nivel mundial, se encontraron dos artículos referidos a la agricultura cuyas estimaciones no sirven para nuestro estudio por motivos similares. El primero de ellos, (Calzadilla, y otros, 2013), nos ofrece los cambios

porcentuales en la producción de toneladas totales de cultivos para dos períodos y dos escenarios de SRES (A1B y A2) con respecto a las simulaciones de referencia (sin cambio climático). Los datos, recogidos en la Tabla 4, muestran el porcentaje de pérdidas según qué factores climáticos afectan.

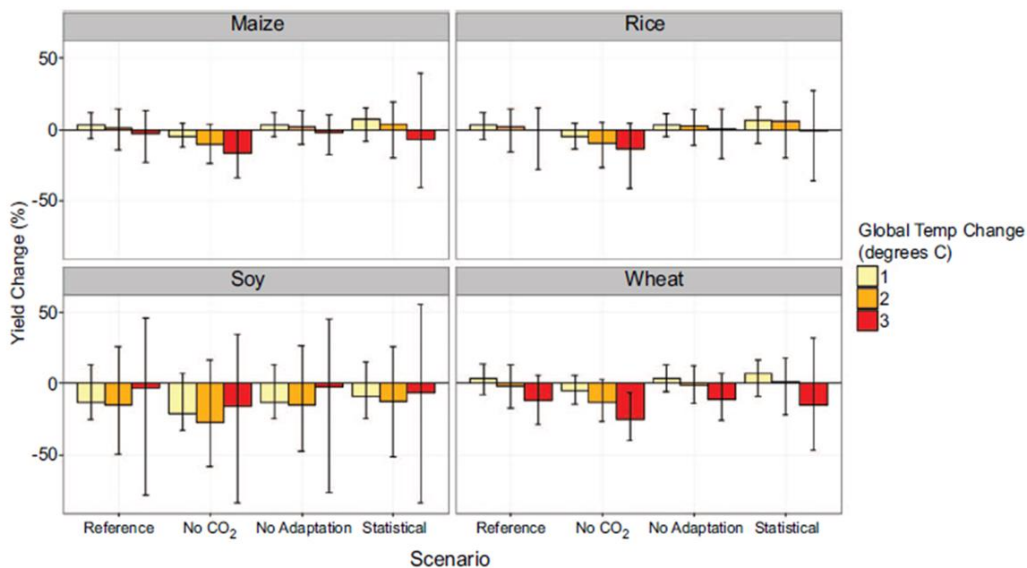
Tabla 4. Cambios en la producción total de cultivos

Regions	Baseline (thousand mt)	Precipitation-only		Precipitation-CO ₂		Precip.-Temp.-CO ₂		Water-only		Water-land		All-factors	
		A1B	A2	A1B	A2	A1B	A2	A1B	A2	A1B	A2	A1B	A2
Results for the 2020s													
Total	9,466,600	0.03	-0.04	0.54	0.46	-0.36	-0.42	0.00	-0.06	-0.04	-0.13	-0.45	-0.53
Results for the 2050s													
Total	13,664,884	0.03	-0.09	2.85	2.74	-2.64	-2.46	0.02	-0.13	0.24	-0.09	-2.28	-2.38

Fuente: (Calzadilla, y otros, 2013)

En segundo lugar, (C Moore, Lantz C Baldos, & Hertel, 2017) expone los cambios porcentuales de rendimiento promedio ponderados de la producción física mundial para los incrementos de temperatura de 1°C, 2°C y 3°C (los tres colores) y para cuatro cultivos diferentes (maíz, arroz, soja y cereales). Estas estimaciones, las cuales se pueden apreciar en el Gráfico 6, están extraídas de los datos recopilados en una revisión literaria de los modelos basados en procesos y los modelos empíricos. Para cada cultivo, se muestran las pérdidas o ganancias en el escenario de referencia (con adaptación al cambio climático y con fertilización del CO₂), sin alguno de los factores anteriores y para las proyecciones de los modelos estadísticos. Además, se aprecia que existe un alto grado de incertidumbre para todas las estimaciones mostradas.

Gráfico 6. Cambios en el rendimiento promedio de los cultivos



Fuente: (C Moore, Lantz C Baldos, & Hertel, 2017)

En ambos estudios, la reducción de la producción agrícola debido al cambio climático hace referencia a aspectos físicos y no monetarios, es decir, se basan en la cantidad de toneladas de productos perdidos y no en la cantidad de dinero que deja de generar la actividad de este sector. Debido a que en la metodología input-output los datos de producción son monetarios, estas estimaciones no nos resultan de utilidad.

Con respecto al sector del turismo, se han encontrado varios estudios regionales, como por ejemplo (Moore, Gomes, Alleyne, & Phillips, 2013). Este trabajo evalúa los impactos sociales y económicos del cambio climático en el producto turístico del Caribe bajo los escenarios climáticos A2 y B2 del IPCC. Sí que posee estimaciones de la pérdida de producción económica provocada por el cambio climático, pero al no ser estimaciones a nivel mundial no se corresponden con los datos buscados. Además de lo anterior, también cuantifica el impacto económico generado en la infraestructura turística, pero ese valor no entra dentro de la producción económica disipada.

Otro análisis turístico regional es (Pütz, Gallati, Kytzia, Elsasser, & Lardelli, 2011), cuyo procedimiento consiste en la realización de entrevistas a turistas sobre su opinión al respecto de la nieve artificial en tres destinos turísticos suizos: Davos, Scuol y Braunwald. También analiza el impacto de la fabricación de nieve artificial en la economía regional en Davos, con un análisis de escenarios basado en un modelo simplificado de la economía regional relacionado con el comportamiento turístico. Su predicción de pérdidas anuales de 1.9-2.45 billones de dólares, para un aumento de 2°C entre los años 2030 y 2050, no resultan útiles para nuestro estudio ya que se refieren a zonas geográficas muy concretas.

Por último, se encuentra (Amelung & Moreno, 2012), el cual simula el efecto del cambio climático futuro para la década de 2080 en el gasto de turismo internacional al aire libre en Europa. La evaluación se basa en la relación estadística entre las noches de cama y un índice de confort humano relacionado con el clima, después de tener en cuenta otros determinantes de las noches de cama, como los ingresos y los precios. Emplea dos escenarios, A2 y B2, y dos conjuntos de datos climáticos: RCAO y HIRHAM. Sus resultados, además de sólo referirse al número de noches anuales contratadas por los turistas, lo cual dista de dar una estimación económica de las pérdidas, y de referirse únicamente al continente europeo, deben tratarse con cuidado ya que el confort térmico es solamente uno de los muchos aspectos que se verán afectados por el cambio climático. Variables como el paisaje, la biodiversidad, la erosión de las playas y el deterioro de monumentos no se tienen en cuenta.

También se halló un estudio de cómo afecta el cambio climático al sector del turismo a nivel mundial, aunque sus resultados no resulten de utilidad. (Bigano, Bosello, Roson, & S. J. Tol, Economy-wide impacts of climate change: a joint

analysis for sea level rise and tourism, 2008) se centra en la evaluación económica de dos impactos climáticos: el aumento del nivel del mar y los cambios en los flujos turísticos. Utiliza una base de datos actualizada para calcular las pérdidas de tierra y un nuevo procedimiento para modelar los cambios de demanda en las opciones de destinos turísticos. Sin embargo, sus estimaciones, como se puede observar en la Tabla 5, no son útiles ya que sólo reflejan el valor de las tierras perdidas por el aumento del nivel mar, además de que esta variable climática no nos puede hacer comparar estos resultados con otros que están calculados a partir de la variación de temperatura.

Tabla 5. Daños del SLR en 25 cm sobre el valor de las tierras perdidas

	Bill. \$
USA	0,121
Canadá	0,072
Europa Occ.	0,298
Europa Este	0,045
Centr. Amér	0,182
Sur Amér.	0,647
Sur Asia	6
Sureste Asia	14,913
Total 16 reg.	33,492

Fuente: (Bigano, Bosello, Roson, & S. J. Tol, *Economy-wide impacts of climate change: a joint analysis for sea level rise and tourism*, 2008)

Para el tercer y último sector económico analizado en este trabajo, que es el del transporte terrestre, se descartaron 4 estudios regionales por motivos similares. El primero de ellos, (Bachner, 2017), analiza los efectos climáticos en Austria empleando un modelo de equilibrio general computable (CGE). Sus resultados, mostrados en la Tabla 6, además de no ser aplicables a nivel mundial ya que son obtenidos para una región concreta, reflejan únicamente el aumento de los impactos directos provocados por el clima en carreteras y vías férreas para 2050, lo cual no representa las pérdidas en la producción económica del sector.

Tabla 6. Variación de los impactos directos del clima en el transporte austriaco

	Impacto dir. (mill. €)	ΔT^a en 2050 (°C)	Δ lluvias en 2050	Impactos dir. 2050 (mill. €)
Carreteras				
Infraestructura	39,04	1,5°C (+3,5°C con respecto a 1880)	Se duplican	78,08
Vehículos	5,82			11,64
Usuarios	1,86			3,72
Total	46,73			93,46
Vías férreas				
Infraestructura	16,11	1,5°C (+3,5°C con respecto a 1880)	Se duplican	32,22
Servicios	0,82			1,64
Vehículos	0,67			1,34
Usuarios	0,78			1,56
Total	18,38			36,76

Fuente: (Bachner, 2017)

El segundo en la lista, que es (Chinowsky, y otros, 2013), es un estudio que simula y analiza para el año 2100 el impacto de las variaciones de temperatura y de precipitaciones, provocadas por el cambio climático, en las carreteras africanas. Emplea una división entre carreteras primarias, secundarias y terciarias y, dentro de estas, en pavimentadas y no pavimentadas. Después, esta división se aplica a zonas climáticas dentro de los países que están basadas en la temperatura y en el nivel de precipitaciones. Sus resultados, además de sólo representar la situación del continente africano y que, por ello, resultan difíciles de ser extrapolados al mundo entero, cuantifican los impactos directos en billones de dólares bajo distintos escenarios, lo cual no reproduce las pérdidas de producción económica que genera la actividad del transporte terrestre.

El tercero es (Neumann, y otros, 2015), el cual analiza el efecto de las variaciones en temperatura, precipitaciones, nivel del mar y tormentas costeras en la infraestructura de carreteras, puentes, desarrollo costero y drenaje urbano en Estados Unidos. Usa varios escenarios de emisiones de GEI y para las carreteras, que es lo que más interesa, estudia los efectos ocasionados por precipitaciones en caminos pavimentados y no pavimentados, y por el calor extremo y congelación/descongelación en caminos pavimentados. Los daños que cuantifica son los impactos económicos directos acumulados hasta 2100 y, por tanto, no tienen utilidad para los intereses de nuestro trabajo.

El último de los informes sobre transporte terrestre descartado es (Nemry & Demirel, 2012), el cual ofrece una perspectiva general a nivel de la Unión europea sobre la vulnerabilidad futura del transporte terrestre (por carretera y ferrocarril) al cambio climático. Emplea tres escenarios de emisiones globales, siendo uno de altas emisiones, otro de medias y el tercero de bajas. Los valores que obtiene como resultado son muy variados, abarcando desde el coste de

las demoras debido a los límites de velocidad de pandeo de las vías, hasta los rangos plausibles para costes futuros en infraestructuras de carreteras debido a inundaciones. Pero todos ellos están alejados de indicar cuál es la cantidad perdida de producción económica debido a los impactos climáticos, además de que sólo es un estudio que abarca el continente europeo.

Llegados a este punto, se puede intuir que las proyecciones de daños económicos que se van a utilizar para realizar las estimaciones pertinentes cumplen con todos los requisitos. Esto quiere decir, en primer lugar, que son valores calculados a nivel mundial, ya que el modelo que se va a utilizar para realizar las simulaciones es MEDEAS-W. Junto con lo anterior, estos datos representan el porcentaje de pérdidas en la producción económica de estos sectores, y esta condición es indispensable debido a que en la metodología input-output los datos de producción son siempre monetarios. Por último, estas proyecciones de daños están ligadas a una misma variable indicadora del cambio climático, que es la temperatura, ya que en MEDEAS se trabaja con este parámetro y, de esta manera, se puede operar con ellas de forma conjunta sin el riesgo de estar comparando elementos distintos. Se eligió la temperatura porque se observó que, en la literatura, en la mayoría de los casos, se trabaja con ella. Esto último se puede explicar con el hecho de que el peligro del cambio climático siempre se asocia con el aumento de la temperatura media global.

Por lo tanto, en las Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20 del ANEXO 1. TABLAS Y GRÁFICOS de este documento, se recogen los porcentajes de daños a las producciones monetarias de los tres sectores estudiados en función del incremento de temperatura. En el título de cada una de ellas se especifica de qué sector se trata y su homólogo en la base de datos WIOD. Además, para cada estimación recopilada se especifica de qué estudio se ha extraído (en la bibliografía de este trabajo aparece la referencia completa de cada artículo), la metodología empleada por los autores de cada texto para llegar a esas conclusiones y el método de obtención del valor empleado y/o el lugar dónde se halla el dato dentro del documento.

No se puede pasar por alto que, debajo de los porcentajes de daños generados por los distintos incrementos de temperatura, están escritas las palabras “absoluto” o “anual” entre paréntesis. La primera de ellas hace referencia a que ese porcentaje proviene de la comparación de los valores de producción económica finales obtenidos en un año concreto, siendo uno resultado de la simulación con impactos climáticos y el otro de la simulación sin ellos. La segunda indica que esas son las pérdidas promedio que cada año sufre la producción debido al cambio climático cuando se da ese incremento de temperatura. Esto pone de manifiesto que existen muchas maneras de introducir los impactos climáticos en el modelo, aunque en este trabajo se ignora esta cuestión y se les trata a todas las estimaciones como “anuales”. El

motivo de esta decisión radica en el hecho de que el modelo MEDEAS-W aplica un porcentaje de daños a la producción sectorial anual. Dicho esto, se deduce que las estimaciones que se emplean en este estudio no son del todo homogéneas. Aun así, y debido a que existe una cantidad similar de las mismas de una clase y de otra, y a que el número de predicciones existentes en la literatura no es muy abundante, se da como aceptable esta hipótesis.

Cabe destacar que para el sector del transporte terrestre hay un grupo de estimaciones cuya región de estudio es Estados Unidos. Todas ellas pertenecen a (Chinowsky, Helman, Gulati, Neumann, & Martinich, 2019). Este conjunto de evaluaciones ha sido aceptado porque representa el porcentaje de pérdidas, derivado de los retrasos o descarrilamientos de los trenes, a causa de la dilatación o expansión de las vías por el calor. Como todas las vías sufrirán de manera similar ante el aumento de la temperatura, se puede considerar que el tanto por ciento económico que se pierde en la actividad ferroviaria mundial será semejante para incrementos térmicos parejos.

6.2. Metodología

Una vez que se tiene una idea de las diferentes estimaciones que se han dado de los impactos climáticos en los sectores económicos analizados, se hace necesario integrar estos daños económicos en el modelo MEDEAS-W que se presentó en el apartado MODELO MEDEAS de este documento. Aunque, antes que nada, es importante explicar en qué consiste la dinámica de sistemas, que es el método utilizado para desarrollar este modelo.

6.2.1 Dinámica de sistemas

Para poder hablar con criterio a cerca de la dinámica de sistemas nos vamos a basar en (Martín García, 2012), el cual es un libro que detalla bastante bien esta metodología. La dinámica de sistemas encuentra sus principales aplicaciones en entornos complejos y poco definidos, donde intervienen las decisiones del ser humano que suelen estar guiadas por la lógica. Además, elabora modelos de gestión en los que se pretende establecer que “la alternativa x es mejor que la alternativa y” y no solamente suministrar datos precisos acerca de la situación futura del sistema modelado.

Dicho esto, se define sistema como un conjunto de elementos independientes con interacciones estables entre sí. El primer paso para entender el funcionamiento de un sistema consiste en definir los elementos que participan en el mismo y las posibles interrelaciones que existen entre ellos. Con ello, queda claro que el objetivo de la dinámica de sistemas es el comprender las causas estructurales que provocan el comportamiento del sistema, lo cual implica incrementar el conocimiento sobre el papel de cada elemento del sistema, y ver cómo diferentes acciones, realizadas sobre partes del sistema, acentúan o atenúan las tendencias de comportamiento implícitas en el mismo.

Otra característica relevante es su enfoque a largo plazo, entendiendo por tal un período de tiempo lo suficientemente amplio como para poder observar las tendencias de comportamiento fundamentales. Pero esta evolución a largo plazo sólo podrá ser comprendida si se identifican las causas fundamentales de las posibles alteraciones, lo cual se consigue con una correcta selección de las variables.

Una vez explicado en qué consiste esta metodología, se deben señalar los diferentes pasos a tener en cuenta para su correcta implementación. El primero de ellos es identificar el problema con claridad y describir los objetivos del estudio con precisión. Tras ello, se ha de completar su definición en base a la suma de conocimientos sobre el tema por parte de expertos, documentación básica sobre el tema, etc. El resultado ha de ser una primera percepción de los “elementos” que están ligados con el problema planteado, las posibles relaciones entre ellos y su comportamiento histórico.

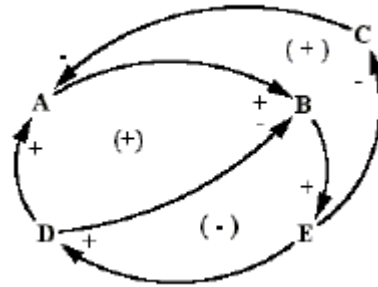
El segundo paso es definir el sistema, el cual ya se ha precisado como un conjunto de elementos relacionados entre sí de tal forma que un cambio en uno de ellos afecta al resto. Los elementos relacionados directa o indirectamente con el problema, y sólo estos, formarán el sistema que se va a estudiar.

A continuación, hay que establecer las fronteras del sistema, es decir, indicar dónde acaba. Solamente se incluirán en el estudio aquellos elementos que tienen una influencia razonable en el comportamiento del sistema, ya que debe contener el menor número posible de los mismos permitiendo, a su vez, poder realizar una simulación y explicar cuál de las propuestas estudiadas es más eficaz.

Después, se tiene que representar el sistema. Para ello se emplea el diagrama causal, que es un diagrama que recoge los elementos clave del sistema y las relaciones entre ellos, las cuales están representadas por flechas entre las variables afectadas por ellas. Dichas flechas irán acompañadas de un signo “+” cuando un cambio en la variable origen produce un cambio del mismo sentido en la variable destino. Sin embargo, irán acompañadas de un signo “-” cuando ese cambio sea en sentido contrario.

Cuando existe una cadena cerrada de relaciones causales se forma un bucle, retroalimentación o feedback. En la construcción de un modelo aparecen bucles, como por ejemplo los formados por ABEDA, DBED y ABECA en la Figura 4.

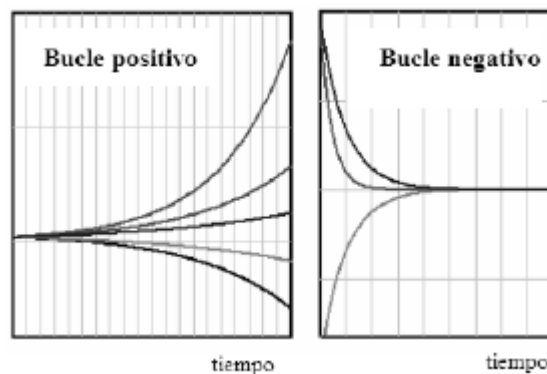
Figura 4. Ejemplo de una cadena cerrada de relaciones causales



Fuente: (Martín García, 2012)

Los bucles se definen como positivos cuando el número de relaciones negativas es par, y negativos si es impar. Por ejemplo, ABEDA es positivo y DBED es negativo. Los bucles negativos llevan al modelo hacia situación estable y los positivos lo hacen inestable, con independencia de la situación de partida.

Figura 5. Comportamiento de los bucles positivo y negativo en el tiempo



Fuente: (Martín García, 2012)

En la realidad los sistemas poseen ambos tipos de bucles y el comportamiento final depende de cuál es el dominante en un instante determinado. Por este motivo es importante comprender cómo la estructura de los sistemas provoca su comportamiento para, así, poder decidir cómo modificar los bucles causales que lo van a alterar.

Se debe comentar también que, siempre en cada momento, existe un único elemento limitativo que restringe el crecimiento del sistema. A lo largo del tiempo, diferentes elementos del sistema pueden ser los que actúen como elementos limitativos. Pero también existen los elementos clave de un sistema, los cuales pueden ser varios a la vez y no suelen cambiar a lo largo del tiempo. Además, estos no son fáciles de identificar. Pueden ser empleados para

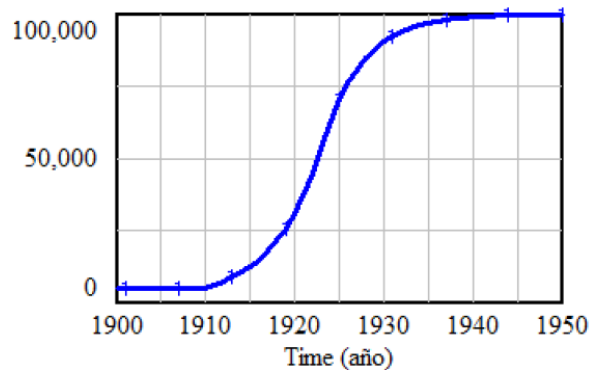
conseguir grandes cambios en el sistema con un esfuerzo mínimo, ya que tienen la capacidad de desencadenar un comportamiento violento del mismo.

La estructura interna determina el comportamiento de los sistemas, y así podemos establecer una tipología de la estructura de los sistemas atendiendo al comportamiento que nos exponen. Un sistema es estable cuando está formado o dominado por un bucle negativo, y es inestable cuando el bucle es positivo. La estructura básica de los sistemas estables está formada por un estado deseado y por un estado real. Estos dos estados se comparan (diferencia), y en base a este valor el sistema toma una acción para igualar el estado real al deseado. Una vez lograda esta igualdad, cualquier alteración de su estado real se traducirá en una acción, proporcional a la diferencia producida, para retomar el estado deseado.

Se hace necesario, por tanto, asegurarse de que el sistema nuevo que se está diseñando sea estable, ya que si es inestable difícilmente se podrá estudiar ya que se habrá deshecho antes de que se pueda analizarlo. De igual manera, si se está diseñando un cambio en un sistema estable, se debe vigilar que no se transforme en uno inestable.

Un tipo de sistema que refleja bien lo explicado hasta ahora es el sigmoidal, cuya respuesta tipo se observa en el Gráfico 7. En un principio, en estos sistemas existe un bucle positivo que actúa como dominante y hace arrancar el sistema exponencialmente. Después, el control del sistema lo toma un bucle negativo que anula los efectos del anterior y proporciona estabilidad al sistema, situándolo en un valor asintóticamente. Es importante darse cuenta que en este caso siempre se está con el mismo sistema, el cual en un período se ve controlado por una parte del mismo y después por la otra. Por lo tanto, para regular su comportamiento se debe encontrar la forma de promover o anular la parte del sistema que interesa. También se debe tener claro que, a medio plazo, será el bucle negativo el que estabilice el sistema en el valor que tenga como objetivo. Sólo se puede regular el plazo y la forma en la que el sistema logrará alcanzar su objetivo.

Gráfico 7. Respuesta tipo de un sistema sigmoidal a lo largo del tiempo



Fuente: (Martín García, 2012)

Por otro lado, el diagrama de flujos es una traducción del diagrama causal a una terminología que permite la escritura de las ecuaciones en el ordenador para así poder validar el modelo, observar la evolución temporal de las variables y hacer análisis de sensibilidad. No hay una forma clara para realizar esta transformación, pero sí que hay una serie de pasos a seguir:

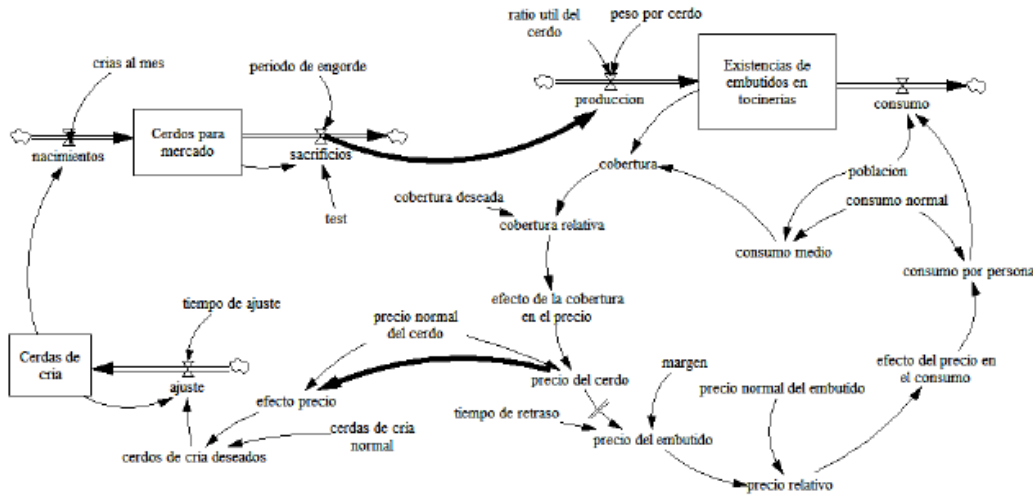
- 1) Hacer una fotografía mental al sistema y lo que salga en ella (personas, km², litros, etc.). Eso son niveles.
- 2) Buscar o crear elementos que sean la variación de los niveles (personas/día, litros/hora, etc.). Esos son los flujos.
- 3) El resto de elementos son las variables auxiliares.

Los niveles, que son representados con un rectángulo, son los elementos que muestran en cada instante la situación del modelo, presentan una acumulación y varían sólo en función de otros elementos denominados flujos. Por su parte, los flujos son elementos que pueden definirse como funciones temporales que recogen las acciones resultantes de las decisiones tomadas en el sistema, determinando las variaciones de los niveles. Se representan con una flecha y un reloj de arena. Las variables, sin embargo, son parámetros que permiten una visualización mejor de los aspectos que condicionan el comportamiento de los flujos. Por último, quedan por definir los retardos, que son funciones que simulan los retrasos que se producen en la transmisión de materiales o informaciones. En los sistemas sociales y económicos son frecuentes los retrasos, y éstos tienen gran importancia en el comportamiento del sistema.

La simulación en el ordenador es la etapa en la que se escriben las ecuaciones concisas para que el ordenador interprete nuestra visión del sistema. Existen diferentes paquetes de software para implementar la simulación, aunque en este TFG se va a emplear VENSIM. En esta etapa se dan valores numéricos a las variables auxiliares del sistema, pero se debe tener en cuenta que estos parámetros se calculan de manera aproximada. Los datos históricos son sólo

un punto de referencia que no tienen una importancia relevante en la evolución posterior del modelo a lo largo del tiempo.

Figura 6. Ejemplo de diagrama de flujos en VENSIM



Fuente: (Martín García, 2012)

6.2.2 Estimación de las funciones de impacto económico

Los daños climáticos se incorporan como reducciones de la producción monetaria de cada uno de los sectores estudiados. En la metodología input-output, la cual fue explicada en la sección 4 de este escrito, la producción de cada sector es representada como X_i , es decir, que $X_i(t)$ representa la producción del sector i en el tiempo t .

Dicho esto, la finalidad de este trabajo es la de modelar, para cada sector, funciones de impacto económico cuyos valores oscilan entre 0 (ningún daño) y 1 (100% de daños). En el segundo de los casos anteriores la producción del sector sería nula. Estas funciones poseen como entrada una variable indicadora del nivel de cambio climático que, como ya se comentó con anterioridad, en el modelo de MEDEAS-W pueden ser el incremento de la temperatura media global, el incremento del nivel del mar, los niveles de concentración de CO2 en la atmósfera o la acidificación de los océanos. También poseen, como valor de salida, ese porcentaje de daños que reduce la producción del sector en un momento determinado y cuyo valor varía en función de las condiciones presentadas por el escenario climático (variable de entrada).

Tras la explicación anterior, ya se puede pasar a estimar las funciones de daño de cada uno de los tres sectores estudiados. Para ello, se parte de los porcentajes de daño asociados a los diferentes aumentos de temperatura media global encontrados en la literatura. Con ellos se crea un gráfico de dispersión en el software Microsoft Excel y se generan todas las posibles

regresiones estadísticas para, después, valorar cuál de ellas es la que mejor se ajusta a los mismos.

En el ANEXO 1. TABLAS Y GRÁFICOS, y más concretamente entre los Gráfico 32 - Gráfico 36 del mismo, se encuentran todas las regresiones elaboradas para los datos de cada sector agrupadas por el tipo de regresión realizada (lineal, exponencial, logarítmica, polinómica y potencial). Además, en cada gráfica se especifica a qué sector hace referencia. Los gráficos de dispersión presentan en el eje de abscisas, como variable independiente (x), la variación de temperatura en grados Celsius mientras que, en el eje de ordenadas, muestran el porcentaje de daños a la producción económica como variable dependiente (y). De esta manera, la función de regresión nos reporta qué cantidad de daños se van a producir para cada incremento de temperatura que nos produzca el modelo. A continuación, en la Tabla 7, se muestra un resumen de las funciones de regresión que se han seleccionado para cada sector. El criterio de selección aplicado es muy simple y lógico, y consiste en quedarse con los coeficientes de determinación (R^2) más altos, ya que este parámetro indica cuánto se ajusta la regresión realizada a los datos encontrados en la literatura. En dos sectores se encontraron dos coeficientes de determinación muy parejos como valores más altos, por lo que se recogen a ambos para, posteriormente, realizar un análisis de sensibilidad de los resultados que generan cada una de estas funciones de daños en la simulación.

Tabla 7. Funciones de regresión seleccionadas para cada uno de los sectores

Sector	Regresión	Ecuación	Coefficiente de determinación (R^2)
Agricultura, caza, pesca y silvicultura (1)	Lineal	$y = 1,7321x - 1,1494$	0,5235
Agricultura, caza, pesca y silvicultura (1)	Polinómica	$y = 0,2894x^2 + 0,0248x + 0,9833$	0,5449
Hoteles y restauración (22)	Polinómica	$y = -0,2386x^2 + 1,7536x - 0,4569$	0,3938
Transporte terrestre (23)	Logarítmica	$y = 3,8864\ln(x) + 0,5112$	0,8272
Transporte terrestre (23)	Polinómica	$y = -0,1433x^2 + 2,2384x - 0,7392$	0,8193

Fuente: Elaboración propia

Llama la atención que los coeficientes de determinación no destacan por ser muy elevados, lo cual se refleja fuertemente en los sectores agrícola y turístico. Esto indica que existen mucha disparidad entre los resultados obtenidos por diferentes modelos y estudios de la literatura, lo cual ya se ha mencionado anteriormente. Además, esta evidencia pone de manifiesto que es necesario precisar mejor estas funciones de daño para que, en futuros estudios al respecto, obtener resultados más veraces.

Cabe destacar que el valor reportado por estas ecuaciones no está comprendido entre cero y uno, ya que si el daño es el 2,2% de la producción te devuelve ese 2,2 y no 0,022. Por lo tanto, y debido a que se ha indicado que los valores de estas funciones de daño deben estar comprendidos entre estas cifras, a la hora de introducir estas ecuaciones en el modelo de MEDEAS-W se debe dividir por cien.

7. INTRODUCCIÓN DE LAS FUNCIONES DE DAÑO EN MEDEAS-W

El modelo MEDEAS-W está compuesto por dos bloques diferenciados, que son el diagrama de flujos elaborado en el software VENSIM y los inputs o entradas recogidos en el Excel “inputs_W”. Para introducir las funciones de daño se han tenido que modificar ambos archivos, aunque aquí se comenzará comentando los cambios realizados en los inputs.

7.1. Modificación de los inputs del modelo

En el Excel donde se recogen todas las entradas del modelo existen diversas hojas. La primera de ellas, llamada “Info input variables”, hace una breve descripción de cada variable modificable en los escenarios. A continuación, las siguientes seis hojas corresponden a los distintos escenarios climáticos, en donde “User defined” y “BAU” corresponden a la historia/escenario Business as Usual, en el cual no hay políticas adicionales de transición y se mantienen las tendencias actuales del cambio climático. Llama la atención que el primero de ellos también haga referencia al escenario BAU, ya que su nombre especifica que es definido por el usuario, pero si no sufre ninguna modificación y mantiene la versión original está configurado con los parámetros de este escenario. El resto de escenarios, que abarcan desde “SCEN1” hasta “SCEN4”, corresponden a diversos escenarios con características diferentes. Se hablará sobre ellos más adelante en este documento.

La pestaña “Economy” incluye los datos relativos a las tablas input-output, intensidades de energía final y demandas de tendencia, mientras que la hoja “Transportation” contiene los datos y parámetros para el modelo de transporte. En “Materials” se incluyen los datos de consumo de material por tecnología y los requerimientos energéticos iniciales para que los materiales estén disponibles, y en “Land” se encuentran los datos usados en el módulo de tierra. Además, el uso de agua por tipo de datos se recoge en la hoja “Water” y las constantes del modelo (cambios de unidades y valores históricos) están en la pestaña “constants”. Por último, en “Parameters” se hallan todos los parámetros del modelo y en “Result comparision” la serie temporal de salidas para comparar con los resultados MEDEAS.

Para introducir las funciones de daño en el modelo, se deben modificar todas las hojas que recogen los distintos escenarios climáticos. Más en concreto, interesa cambiar las filas 316-330 de cada una de ellas. Para verlo de forma más clara se muestran las modificaciones ejercidas en la pestaña “BAU”, aunque para todos los escenarios se introducen los mismos cambios.

Tabla 8. Activación de los impactos climáticos

Climate change impacts			
Activate CC impacts? (Y=1/N=0)	1		
Sector-uniform (1) / per sector (0) CC impacts?	0		
Uniform sectoral CC impacts		Identifier	
Selection of option for sector-uniform CC impacts	3	0. No impacts	
		1. Energy losses function ELF(CO2)	
		2. "Low impacts" DF(ΔT) parabolic MEDEAS-W	
		3. "Medium impacts" DF(ΔT) parabolic MEDEAS-W	<i>From the fifth option (including this one) the damage functions are specific to a sector and, therefore, can only be included in the "per sector" mode</i>
		4. "High impacts" DF(ΔT) parabolic MEDEAS-W	
		5. DF(ΔT) polynomial agriculture	
		6. DF(ΔT) lineal agriculture	
		7. DF(ΔT) polynomial tourism	
			8. DF(ΔT) logarithmic inland transport
	9. DF(ΔT) polynomial inland transport		

Fuente: Elaboración propia

Para que el modelo tenga en cuenta las funciones de daño se tiene que escribir un “1” en la casilla amarilla que responde a la pregunta de si activar los impactos del cambio climático o no, tal y como se muestra en la Tabla 8. Además, se puede elegir que todos los sectores económicos se vean afectados por la misma función o que, por el contrario, cada sector se vea influido por unos impactos climáticos específicos. Esta elección se realiza respondiendo a la segunda pregunta con un “0” si se quiere que cada sector sea vea afectado por una función de daño en particular, y con un “1” si se busca que todos los sectores climáticos vean afectada su producción económica de la misma manera. Debido a que en este trabajo se han estudiado tres sectores de manera específica, la respuesta elegida es que cada sector se vea afectado de manera independiente.

En las casillas con relleno de color grisáceo de la Tabla 8 se especifica el número asignado a cada una de las funciones de daño introducidas en el modelo. El “0” significa que el sector o los sectores no sufren ningún tipo de impacto climático en su producción económica. Las opciones comprendidas entre los números del uno al cuatro representan las funciones de daño que ya venían programadas por defecto. La primera de ellas estima las pérdidas de energía en función del nivel de CO2 en la atmósfera. Las tres siguientes computan los bajos, medios y altos impactos climáticos en función del incremento de la temperatura media global, y estas funciones de daño están calibradas para provocar pérdidas del 1%, 2% y 3% del PIB per cápita, respectivamente, para un incremento de 1,75°C. Por último, desde la quinta opción hasta la novena y última, ya se hace referencia a las funciones de daño que se han obtenido para los tres sectores económicos estudiados a lo largo de este documento. En la casilla con el texto en color rojo se indica que estas últimas funciones sólo deben ser introducidas en la modalidad “per sector” y que cada una de ellas se refiere a un sector específico.

Como último apunte con respecto a la Tabla 8, el número “3” situado en la tercera casilla amarilla indica que, si se elige que todos los sectores se vean

afectados por los mismos impactos climáticos, la función de daño que realiza esos impactos es la tercera, es decir, la que representa los impactos medios en función del incremento de temperatura.

Para la situación en la que se elige una función de daño concreta para cada sector se deben rellenar las casillas amarillas de la Tabla 9. En ella se han representado, principalmente, los tres sectores económicos estudiados en este trabajo, aunque se puede ver al completo en las filas 328-330 de los distintos escenarios climáticos que se encuentran en el Excel “inputs_W”. Obviamente, a cada uno de estos tres sectores se le asigna una función de daño calculada específicamente para él, por lo que a agricultura se le asigna la número 5 y a turismo la número 7. Al resto de sectores se les ha asignado la número 3, aunque para ellos son seleccionables cualquiera de las ecuaciones calculadas de forma general o la opción no impactos climáticos.

Tabla 9. Elección de las funciones de daño que afectan a cada sector

Per sector CC impacts through damage function DF(ΔT)					
Sector	Agriculture, Hunting, Forestry and Fishing	Mining and Quarrying	...	Hotels and Restaurants	Inland Transport
Identifier of	5	3	...	7	8

Fuente: Elaboración propia

Los diversos parámetros de las distintas funciones de daño se registran, como entradas del modelo, en la tabla que abarca las filas 318-323 y las columnas E-M de todas las pestañas del Excel “inputs_W” que hacen referencia a los distintos escenarios climáticos. En la Tabla 10, para simplificar, sólo se representan los parámetros de las funciones de daño específicas de los tres sectores estudiados.

Se puede observar que el número asignado a cada ecuación coincide con el que se le asignó en las celdas grises de la Tabla 8. Además, para cada una de ellas se especifica el tipo de regresión aplicada para obtenerla y a qué sector económico hace referencia.

Tabla 10. Parámetros de las funciones de daño como inputs del modelo

Select taking into account the expected ΔGDP_{pc} of each scenario						
Equation parameters DF(ΔT)	5. DF(ΔT) polynomial agriculture	6. DF(ΔT) lineal agriculture	7. DF(ΔT) polynomial tourism	8. DF(ΔT) logarithmic inland transport	9. DF(ΔT) polynomial inland transport	
a	0,2894	1,7321	-0,2386	3,8864	-0,1433	
b	0,0248	-1,1494	1,7536	0,5112	2,2384	
c	0,9833	0	-0,4569	0	-0,7392	
Sector	Agriculture	Agriculture	Tourism	Inland transport	Inland transport	

Fuente: Elaboración propia

Como se puede comprobar, el valor de estos parámetros coincide con el valor de los parámetros de las funciones de daño seleccionadas para cada sector en

la Tabla 7. Para explicar la afirmación anterior se toma de ejemplo la función de daño polinómica del sector agrícola. En ella, se observa que la ecuación tiene la forma siguiente:

$$y = a*x^2 + b*x + c$$

Y que, por lo tanto, los valores a, b y c recogidos en la Tabla 10 son las constantes que componen esta función de daño.

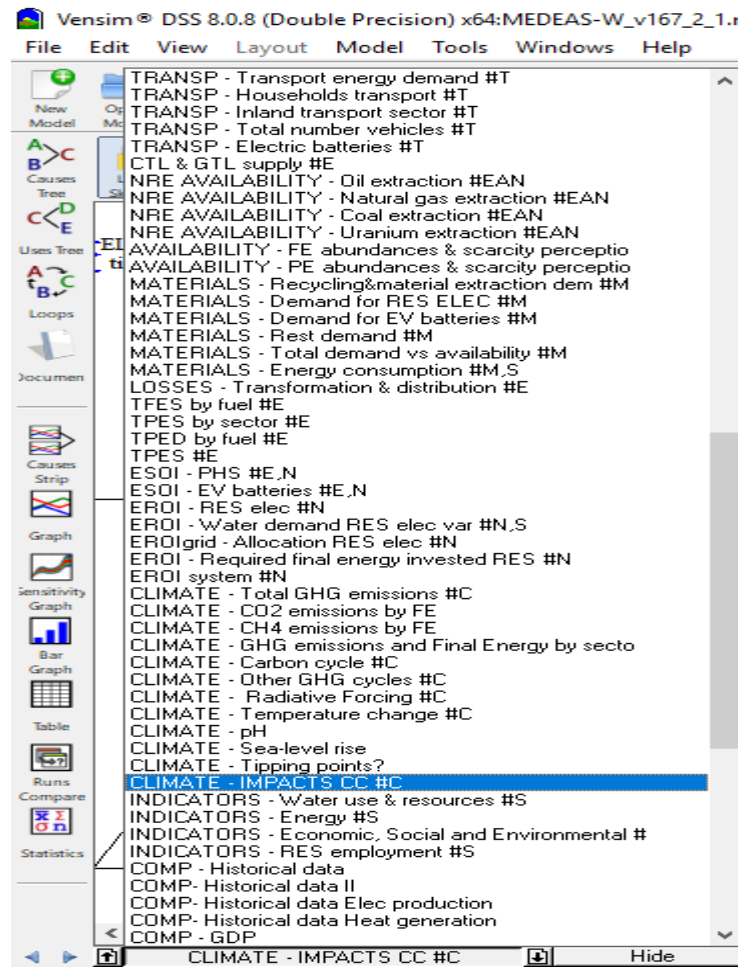
Se debe resaltar que los valores mostrados en las casillas amarillas de decisión de las Tabla 8 y Tabla 9 pueden y deben ser modificados en función de los resultados que se quieran obtener en la simulación del modelo. Por ejemplo, si se quiere comparar la evolución temporal del PIB con daños climáticos sectoriales y sin ellos, se deben activar o desactivar, respectivamente, las funciones de daño en las sucesivas simulaciones.

7.2. Modificación del diagrama de flujos en VENSIM

Como se puede imaginar, el modelo MEDEAS-W requiere de un diagrama de flujos bastante grande para ser representado. Para reproducirlo correctamente en VENSIM, se requiere crear muchas ventanas, interrelacionadas entre sí, en las que se representan partes concretas del modelo. Un grupo de estas pestañas se pueden observar en la Figura 7.

Para poder acceder a cualquiera de ellas hay que pulsar en el recuadro inferior que tiene escrito "CLIMATE - IMPACTS CC #C", que en ese instante se llama así debido a que nos encontramos en la ventana de trabajo que lleva ese nombre, y después seleccionar la pestaña a la que se quiere acceder. Para los intereses de este trabajo, se tienen que realizar las modificaciones en la pestaña que se ha mencionado anteriormente y que viene resaltada con fondo azul en la Figura 7, ya que en ella se introducen las funciones de daño al modelo.

Figura 7. Pestañas creadas en VENSIM para reproducir el modelo MEDEAS-W

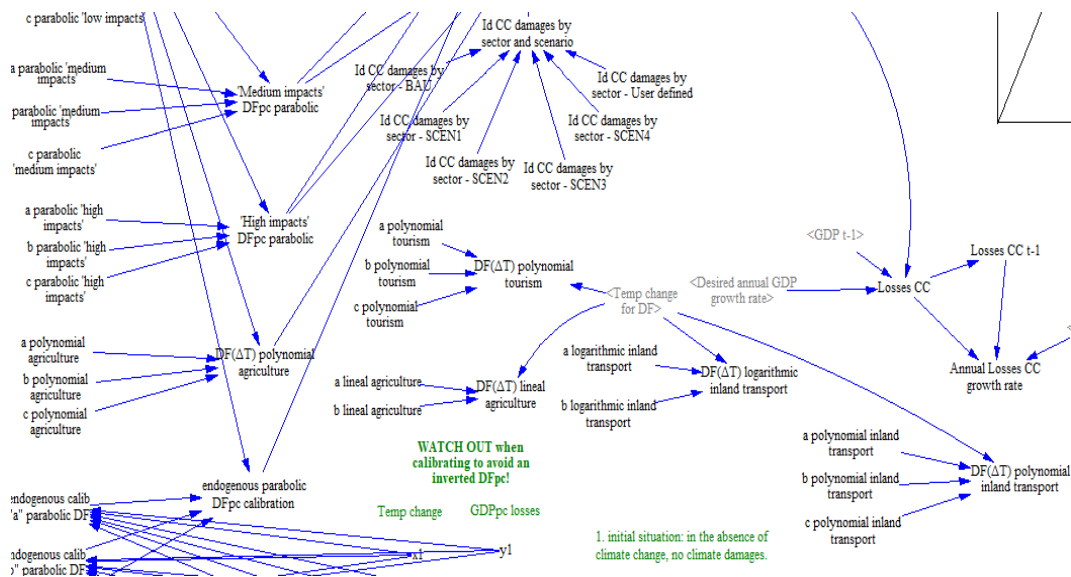


Fuente: Elaboración propia

Dentro de esta ventana de trabajo existen una gran cantidad de variables, aunque, obviamente, en un principio no se encontraban las referentes a las funciones de daño sectoriales calculas en este trabajo. Por lo tanto, se crea una variable auxiliar por cada una de las cinco funciones de daño (DF) sectoriales obtenidas. En la Figura 8 se muestran a todas ellas dentro del diagrama de flujos, las cuales han sido denominadas de la siguiente manera:

- DF(ΔT) polynomial agriculture.
- DF(ΔT) lineal agriculture.
- DF(ΔT) polynomial tourism.
- DF(ΔT) logarithmic inland transport.
- DF(ΔT) polynomial inland transport.

Figura 8. Variables que representan las funciones de daño sectoriales



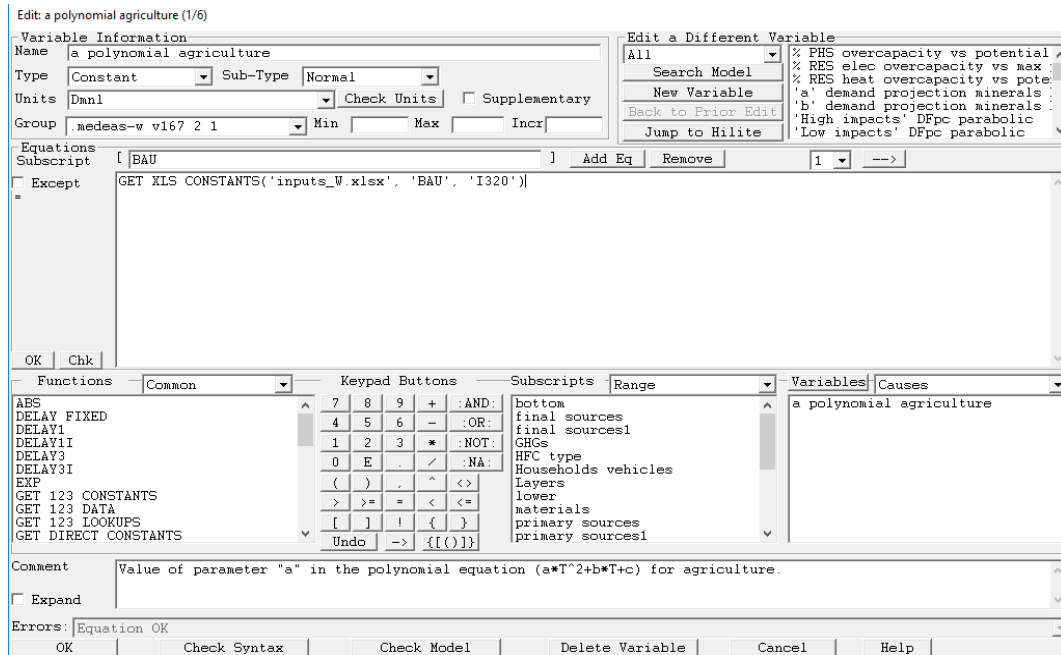
Fuente: Elaboración propia

Además, se observa que todas estas variables sufren la influencia directa de sus respectivos parámetros a, b y c, los cuales ya se han explicado con anterioridad. Debido a que estos parámetros intervienen en el comportamiento de las funciones de daño (DF), se analizan en primer lugar. Estos también han sido introducidos como variables auxiliares, y como todos ellos van a ser configurados de la misma manera, nos centramos en uno de los parámetros de la función de daño polinómica del sector agrícola para explicar a todos ellos.

Su cuadro de diálogo se muestra en la Figura 9. Para acceder a él se debe pulsar sobre el comando “Equations”, el cual está representado por un “f(x)” de color rojo, y después pulsar en la variable de la que queremos abrir el cuadro de diálogo.

En unidades se le asigna la dimensión “Dmnl”, que significa que es una variable sin unidades. Después, como ecuación de la variable se le asigna la función “GET XLS CONSTANTS”, la cual extrae el valor recogido dentro de una hoja de Excel. En concreto, para el ejemplo recogido en la Figura 9, se le pide a la función que asigne a esta variable del modelo el valor que se encuentra en la celda “I320” de la hoja “BAU” del Excel “inputs_W”, ya que es donde está registrado el valor del parámetro. Con este procedimiento queda visto, también, cómo se introducen las entradas del modelo en VENSIM. En comentarios se explica el parámetro para el que se aplica dicho cuadro de diálogo. Por último, se tiene que pulsar el botón “OK” de la esquina inferior izquierda para que queden guardados las modificaciones realizadas en el cuadro de diálogo.

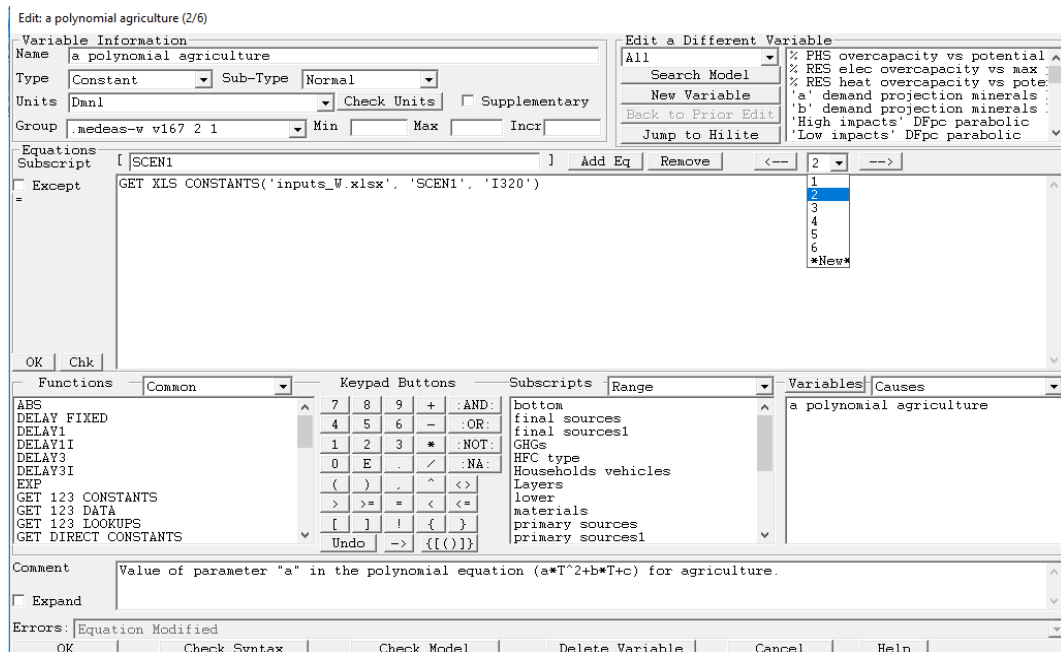
Figura 9. Cuadro de diálogo para los parámetros de las DF en VENSIM



Fuente: Elaboración propia

Se debe introducir una ecuación para cada escenario climático. En la Figura 9, esa función está suscrita al escenario “BAU”, lo cual se observa en el recuadro que se encuentra a la derecha de “Equations Subscript”. Para moverse de un escenario a otro se utiliza la lista desplegable que se observa en la Figura 10.

Figura 10. Inserción de los parámetros de cada escenario climático en VENSIM

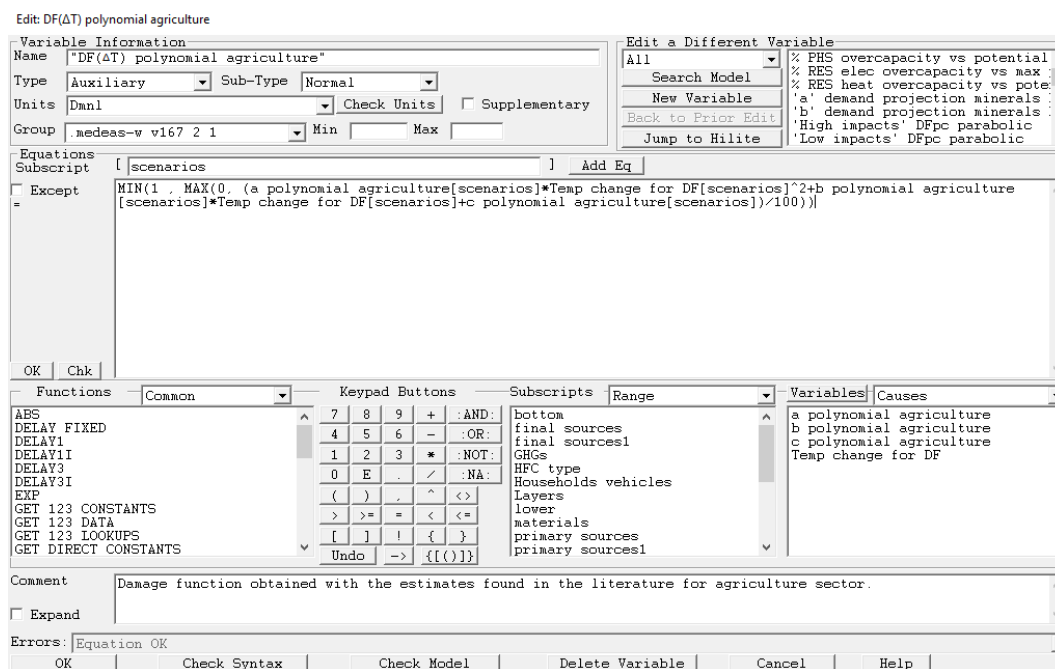


Fuente: Elaboración propia

A la hora de introducir la función correspondiente para cada escenario climático, se pulsa sobre el botón “Add Eq” y se introduce la ecuación. Para el caso mostrado en la Figura 10, la función “GET XLS CONSTANTS” ahora debe buscar el valor en la hoja “SCEN1” del Excel “inputs_W”, ya que esta ecuación está abonada al escenario 1. Por último, se escribe el nombre del escenario al que va a estar suscrita esta función en el recuadro que se encuentra a la derecha de “Equations Subscript”.

Una vez explicada la manera en que se introducen los parámetros de las funciones de daño en el modelo, es el turno de comentar los pasos a seguir para insertar a las propias funciones de daño en MEDEAS-W. Como ya se comentó con anterioridad en este mismo documento, se crea una variable auxiliar para cada una de ellas. Como el procedimiento a seguir es similar para todas, se toma como ejemplo a la función polinómica del sector agrícola, lo cual sirve para explicar a las cinco en su totalidad. En el cuadro de diálogo que se muestra en la Figura 11 se introduce el nombre que se le ha otorgado a esta variable y se le asigna, al igual que pasaba con los parámetros de las funciones de daño, la unidad “Dmnl” ya que es una variable sin unidades. Además, se añade una nota informativa de lo que representa esta variable dentro del modelo en el apartado de comentarios.

Figura 11. Cuadro de diálogo para las funciones de daño en VENSIM



Fuente: Elaboración propia

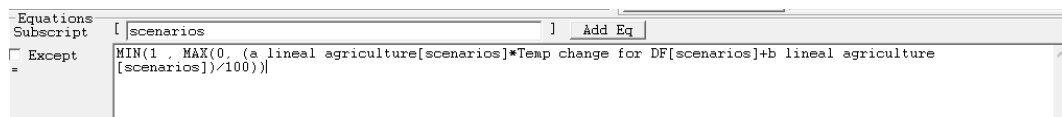
Con respecto a la ecuación introducida, comienza jugando con las funciones de mínimo y máximo para asegurarse de que el valor que se obtiene aplicando la función de daño está entre cero y uno. Esto ya se explicó en el apartado 6.2.2

de este documento. Además, como también se comentó en ese mismo epígrafe, el valor que devuelven las funciones de daño no está comprendido entre cero y uno, sino que es el porcentaje de daños sin dividir entre cien (da como resultado 22% y no 0.22). Por este motivo se divide por cien al final de la ecuación. El valor de los parámetros se introduce poniendo el nombre de la variable auxiliar que los representa, lo cual se puede hacer pulsando a la variable en concreto de entre las que aparecen en la lista de la esquina inferior derecha “Variables (Causes)”. Para que una variable aparezca en esa lista debe de ejercer una influencia en la función de daño, es decir, que debe lanzar una flecha hacia la variable que representa la función de daño en el diagrama causal (ver en la Figura 8 cómo las variables de los parámetros envían flechas a las variables que representan a las respectivas funciones de daño).

Por último, y como también se indicó en el apartado 6.2.2 de este documento, se debe recordar que los impactos climáticos sectoriales se calculan en función del incremento de la temperatura media global, por lo que en las funciones de daño se tiene que introducir una variable que nos reporte ese incremento de temperatura generado en la simulación del modelo. Esa variable es “Temp change for DF”, que como se puede apreciar en la Figura 8, influye directamente en todas las variables que representan a las distintas funciones de daño.

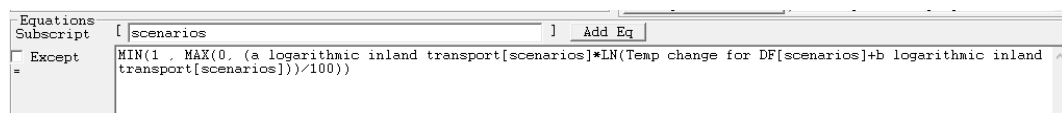
Por lo tanto, en el caso mostrado en la Figura 11, la ecuación implementada representa a la función de daño polinómica del sector agrícola, es decir, que sigue la estructura: $a \cdot \Delta T^2 + b \cdot \Delta T + c$. Sin embargo, las funciones de daño lineal de la agricultura y logarítmica del transporte terrestre corresponden a unas estructuras de ecuación diferentes. Sus respectivas inserciones en el modelo se muestran en las Figura 12 y Figura 13 que se muestran a continuación.

Figura 12. Implementación de la DF lineal del sector agrícola en VENSIM



Fuente: Elaboración propia

Figura 13. Implementación de la DF logarítmica del transporte terrestre en VENSIM

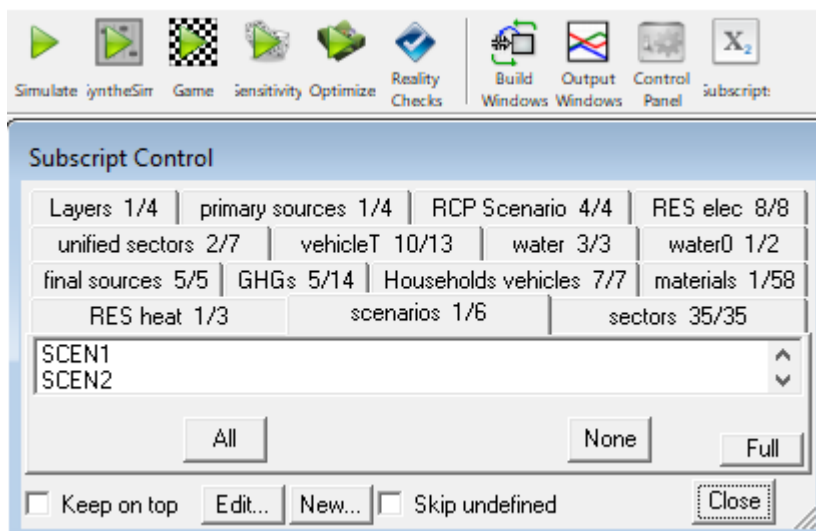


Fuente: Elaboración propia

No se puede pasar por alto que tanto los parámetros como el incremento de temperatura van acompañados de unos corchetes en los que va escrito “scenarios”. Esto quiere decir que en función del escenario climático que se elija para la simulación del modelo, estas variables tendrán un valor u otro. Por ejemplo, el incremento de temperatura no será el mismo en el escenario “BAU” que en el escenario “SCEN1”. Esto se consigue escribiendo la palabra “scenarios” en el recuadro de “Equations Subscript”, ya que después de ello aparecerá automáticamente esta asignación al introducir los términos de la ecuación.

Para elegir el escenario climático con el que se quiere simular el modelo en VENSIM, se tiene que pulsar sobre el comando “Subscripts” que aparece en la esquina superior derecha de la Figura 14. Después, aparece un cuadro de diálogo similar al que también se puede apreciar en esta imagen. Si se pulsa sobre el botón “scenarios 1/6” se pueden seleccionar los escenarios climáticos. El modelo se puede simular pudiendo tener elegidas todas las opciones o simplemente una de ellas. Esto va a resultar de especial importancia a la de hora de simular el modelo y obtener resultados concretos.

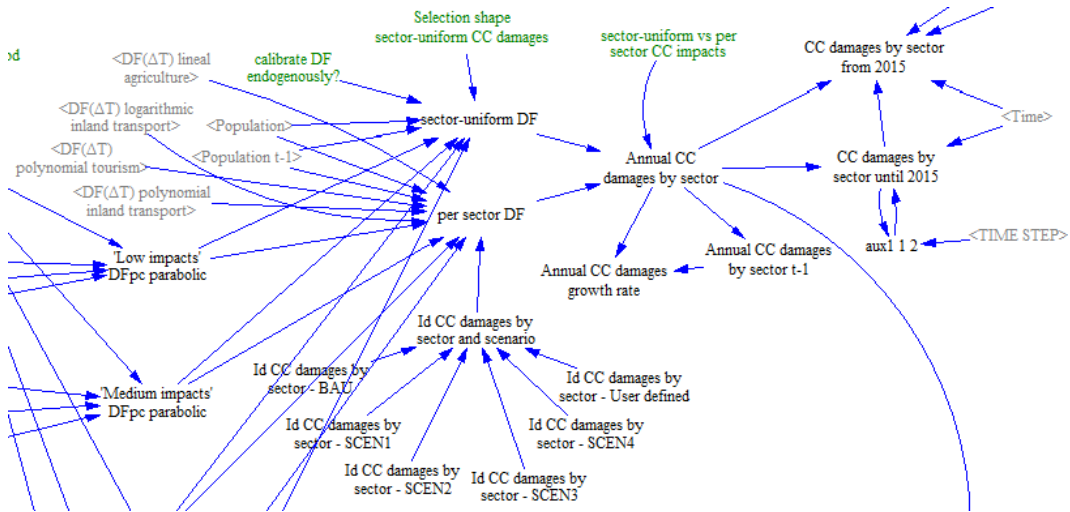
Figura 14. Elección del escenario climático con el que se simula el modelo



Fuente: Elaboración propia

Tras todos los pasos dados anteriormente, se llega al momento en el que se tiene la necesidad de hacer que estas funciones de daño influyan en la dinámica del modelo. Para ello, se dibujan flechas de influencia desde todas las variables que representan a las funciones de daño hasta la variable “per sector DF”, tal y como se muestra en la Figura 15. No se generan flechas de influencia hacia la variable “sector-uniform” porque las funciones de daño son específicas de ciertos sectores económicos y, por tanto, no pueden aplicarse a todos los sectores por igual.

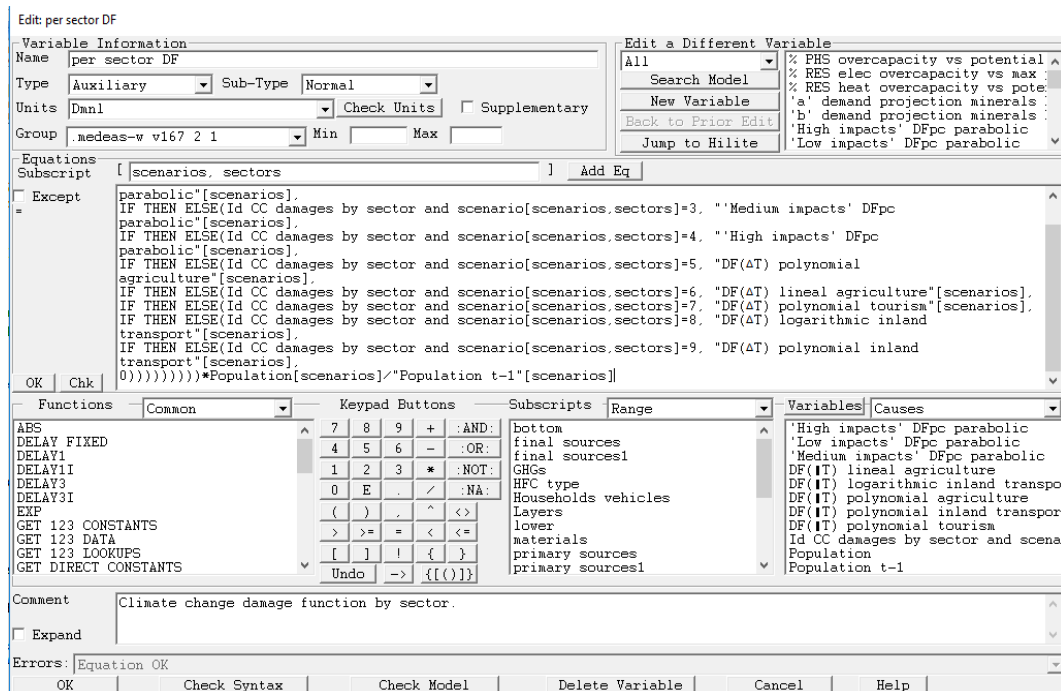
Figura 15. Inserción de las DF en la dinámica del modelo en VENSIM



Fuente: Elaboración propia

Tras ello, se debe reconfigurar la variable “per sector DF” para que las funciones de daño tengan influencia durante las simulaciones del modelo. El estado final que muestra el cuadro de diálogo tras los cambios efectuados en él se muestra en la Figura 16. Al igual que pasaba con las otras variables analizadas, no posee unidades, por lo que se le asigna “Dmnl”.

Figura 16. Cuadro de diálogo de la variable “per sector DF” en VENSIM



Fuente: Elaboración propia

Esta variable está suscrita a escenarios y sectores, lo cual significa que el valor de los parámetros que conforman la ecuación que la representa varía en función del estado de ambos. Esto es lógico ya que se trata de la situación en la que se decide que cada sector económico puede verse afectado por una función de daño diferente a la del resto.

Dicho esto, ya se puede pasar a explicar el significado de la función introducida a esta variable. En la Figura 16 se observa que se encadena una serie condicional de “IF THEN ELSE”, lo cual permite que la variable tenga un valor u otro dependiendo de si cumple o no la condición. Ya que está suscrita a escenarios y sectores, a la hora de simular va a ir revisando qué opción de función de daño se ha asignado a cada sector para cada escenario climático en el Excel “inputs_W”. Gracias a ello, si se elige que los impactos climáticos actúen de manera individual según cada sector económico, cada uno de ellos verá afectada su producción económica conforme a la función de daño que se le ha asignado.

Se debe tener en cuenta que la variable “Id CC damage by sector and scenario” recoge todos los números asignados a cada sector económico, pasando por todos los escenarios climáticos, en la opción “per sector” del Excel “inputs_W”. Es por esto por lo que, en cada “IF THEN ELSE”, se compara si esta variable es igual a 1, 2, 3, ... o 9 (ya que son 9 las funciones de daño que posee el modelo).

Para introducir las funciones de daño que se han calculado en este trabajo, simplemente se han tenido que añadir los “IF THEN ELSE” necesarios en la ecuación de esta variable, ya que esta variable ya se encontraba configurada con las funciones de daño uniformes.

Con respecto al resto del modelo MEDEAS-W no se realiza ningún cambio más. La finalidad de este trabajo es introducir en el modelo los impactos económicos que genera el cambio climático en la producción de un cierto número de sectores, que es lo que ya se ha conseguido realizando las modificaciones explicadas anteriormente en el diagrama de flujos en VENSIM y en el Excel “inputs_W”. El cómo afectan estos daños climáticos al crecimiento del PIB mundial, o el cómo varía la temperatura según cada escenario climático, ya venía configurado en el modelo. Por lo tanto, ya se puede pasar a obtener resultados simulando el modelo.

8. RESULTADOS OBTENIDOS

Para poder obtener resultados con diversas simulaciones del modelo MEDEAS-W, se debe de pulsar el comando “Simulate” de VENSIM una vez que se haya configurado previamente de manera correcta. Esto quiere decir que, antes de cada simulación, se tiene que indicar en el Excel “inputs_W”, por ejemplo, qué función de daño se quiere que afecte a cada sector o si queremos que estén activados los daños climáticos o no. También se debe de indicar, en el comando “Subscripts” de VENSIM, qué escenarios climáticos se desea que sean simulados.

Dicho esto, es necesario definir en qué consiste cada escenario climático presente en MEDEAS-W. De esta manera, se podrá seleccionar cuáles de ellos nos interesa comparar y simular.

8.1. Elección y simulación de los escenarios climáticos

Toda la información acerca de los diversos escenarios implementados en MEDEAS-W se encuentra en (Capellán -Pérez, Mediavilla, de Castro, Carpintero, & Miguel, 2014). La metodología de escenarios ofrece un enfoque para lidiar con el conocimiento limitado, la incertidumbre y la complejidad de las ciencias naturales y sociales y, aplicada a los modelos de dinámica de sistemas, se puede utilizar para agrupar las variaciones de políticas en escenarios coherentes y significativos. Cada escenario (o historia) representa una visión arquetípica y coherente del futuro.

El escenario Business as Usual (BAU), del cual ya se ha hablado con anterioridad en este documento, representa la línea de referencia. En él no hay políticas adicionales de transición y se mantienen las tendencias actuales del cambio climático. Además, como también se comentó en apartados anteriores, el escenario “User defined” está configurado de igual manera que el BAU, por lo que su participación en las simulaciones ya está descartada.

Dicho esto, se pasa a definir cada uno de los otros cuatro escenarios existentes:

- **Escenario 1 (SCEN1):** Optimismo económico con algunas reformas del mercado. En él existe un fuerte enfoque en el mecanismo de competitividad, mercado eficiente, libre comercio y el rápido crecimiento económico asociado, pero incluyendo algunos supuestos de política adicionales destinados a corregir algunas fallas del mercado con respecto al desarrollo social, el alivio de la pobreza o el medio ambiente. Además, en este escenario se supone que existe un rápido desarrollo tecnológico y un bajo crecimiento de la población. Los recursos energéticos y materiales escasos se actualizan a reservas o se sustituyen eficientemente y, eventualmente, todos se beneficiarán de la

globalización y los avances tecnológicos solucionarán los problemas ecológicos.

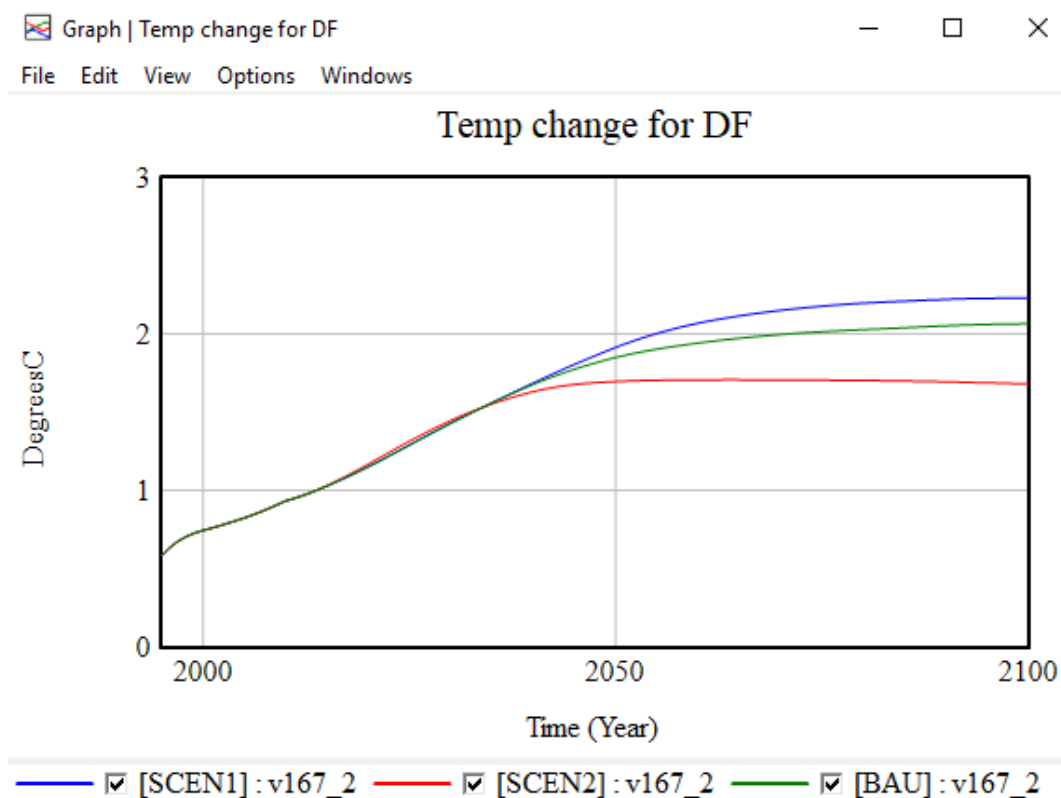
- Escenario 2 (SCEN2): Desarrollo sostenible global. En él hay una fuerte orientación hacia la protección del medio ambiente y la reducción de la desigualdad, basada en soluciones encontradas a través de la cooperación global, el cambio de estilo de vida y la tecnología. Los elementos centrales son un alto nivel de conciencia ambiental y social combinado con un enfoque global coherente para el desarrollo sostenible. En este escenario se asume que es posible y necesario un alto nivel de coordinación internacional para enfrentar problemas globales como el alivio de la pobreza, la protección del clima y la conservación e la naturaleza. Implica una regulación de los mercados a escala global basada en el convencimiento de que los límites del planeta están a la vista y de que se necesitan políticas proactivas.
- Escenario 3 (SCEN3): Competencia regional/mercados regionales. En este escenario se asume que las regiones se centrarán más en su autosuficiencia, soberanía nacional e identidad regional, lo que conducirá a la diversidad, pero también a tensiones entre regiones y/o culturas. Los países se preocupan por la seguridad y la protección, enfatizando principalmente los mercados regionales (proteccionismo, desglobalización) y prestando poca atención a los bienes comunes. Debido a ello, las mejoras tecnológicas y su difusión avanzan más lentamente.
- Escenario 4 (SCEN4): Desarrollo sostenible regional. Este escenario es la versión amistosa del anterior, donde la globalización tiende a romperse y ocurre un cambio importante en los valores tradicionales y las normas sociales frente al consumismo insensato y la falta de respeto por la vida. Los ciudadanos y los países deben asumir cada uno las responsabilidades que puedan asumir, prestando ayuda o dando un ejemplo verde al resto del mundo, desde el sentido del deber, por convicción o por razones éticas o para resolver principalmente sus propios problemas. De hecho, aunque se reconstruyen las barreras para los productos, las barreras para la información tienden a eliminarse. El foco está en encontrar soluciones regionales para los problemas ambientales y sociales, que generalmente combinan cambios drásticos en el estilo de vida con la descentralización de la gobernanza.

Como se puede deducir de las explicaciones anteriores, los dos primeros escenarios se refieren a un mundo globalizado, mientras que el tercero y el cuarto representan todo lo contrario. Observando la dinámica del mundo actual, se hace muy improbable conseguir que los dos últimos casos se hagan realidad, lo cual hace centrar las miradas en los dos primeros escenarios. Además, el primer escenario resulta tomar un camino totalmente distinto al del

segundo, lo cual es enriquecedor a la hora comparar y analizar los resultados de ambos.

Dicho esto, se va a simular el modelo MEDEAS-W implementando los escenarios “SCEN1”, “SCEN2” y “BAU”. La variable más importante que nos va a aportar cada uno de ellos para las funciones de daño y que, además, les va a hacer diferentes a unos de otros, es el incremento de temperatura a lo largo del tiempo. Para obtener el gráfico de esta variable, primero se tiene que dar a simular el modelo en VENSIM habiendo seleccionado, previamente, a estos tres escenarios en el comando “Subscripts” que se mostró en la Figura 14. Después, estando en la pestaña “CLIMATE – IMPACTS CC #C”, se pulsa sobre la variable “Temp change for DF” y, seguidamente, en el comando “Graph” que se encuentra en la columna de la izquierda, obteniendo el resultado que muestra en el Gráfico 8. Los resultados mostrados son para la situación en la que todos los sectores están afectados por el cambio climático.

Gráfico 8. Variación temporal de la temperatura en los tres escenarios elegidos



Fuente: Elaboración propia

El incremento de temperatura es parejo para los tres escenarios hasta, aproximadamente, el año 2035. A partir de entonces, el escenario 2, que es el que implementa el desarrollo sostenible, sufre un leve incremento alcanzando su máximo valor de 1.71°C en el año 2065. Después, sufre un leve descenso hasta alcanzar los 1.68°C en el año 2100, aunque se puede decir que desde

el año 2045 el incremento de temperatura permanece estable. Sin embargo, el incremento de temperatura es significativamente superior en los otros dos escenarios, lo cual es lógico porque ninguno de los dos aplica las políticas de protección del medio ambiente que sí que aplica el escenario 2. En el escenario BAU, la temperatura media global continúa aumentando hasta obtener un valor de incremento de temperatura de casi 2.1°C en el año 2100. Por su parte, en el escenario 1 la temperatura media global también sufre una subida continua año tras año, pero alcanza el valor de incremento más alto a finales de siglo, situándose en torno a los 2.2°C en el año 2100.

Como conclusión al respecto, se puede observar que ninguno de los tres escenarios consigue alcanzar la cifra de $+1.5^{\circ}\text{C}$ al final de siglo establecida en la cumbre climática de París de 2015. Además, los escenarios 2 y BAU superan la cifra de $+2^{\circ}\text{C}$ en el año 2100. Añadido a lo anterior, también es importante resaltar que todos los escenarios se encuentran muy lejos de alcanzar los $+4^{\circ}\text{C}$ que preveían algunos estudios a final de siglo.

Conocidos los incrementos de temperatura que ofrecen los tres escenarios del modelo, ya se puede pasar a observar cómo influyen en el desarrollo de las economías sectorial y mundial a través de las funciones de daño.

8.2. Efecto de las funciones de daño en la economía mundial

Para ver cómo han influido las funciones de daño sectoriales en los resultados del modelo, es necesario analizar la evolución que han tenido en el tiempo ciertas variables del mismo. Por lo tanto, se hace necesario realizar, en primer lugar, una búsqueda en el modelo para encontrar aquellas variables que nos van a aportar los valores requeridos. A continuación, se detallan cuáles de ellas se han considerado interesantes para poder obtener un buen análisis.

La variable “CC damages by sector from 2015”, que se encuentra en la pestaña “CLIMATE – IMPACTS CC #C” del modelo en VENSIM, nos indica el porcentaje de pérdidas económicas que han sufrido los sectores económicos cada año. Representa, por tanto, el valor que devuelve cada una de las funciones de daño con respecto al incremento de temperatura que se produce en el escenario correspondiente.

Por otro lado, si nos trasladamos a la pestaña del modelo en VENSIM llamada “ECON – Confrontation demand with limits #e,E,C,N”, nos encontramos con las variables “GDP by sector” y “GDP by sector growth rate”. La primera de ellas nos indica cómo varía la producción económica generada por cada sector año tras año, y la segunda representa la tasa de crecimiento que tiene la producción económica generada por cada sector cada año. De igual forma, en la misma pestaña también se encuentran las variables “GDP” y “Annual GDP growth

rate”, las cuales muestran resultados similares a los ofrecidos por las dos variables anteriores, aunque ahora refiriéndose al PIB global y no al sectorial.

Con el objetivo de realizar este estudio de una forma ordenada y clara, se va a proceder a analizar cada uno de los escenarios por separado. Después, se hará una comparación entre los resultados de todos ellos.

8.2.1 Influencia de las funciones de daño en el escenario BAU

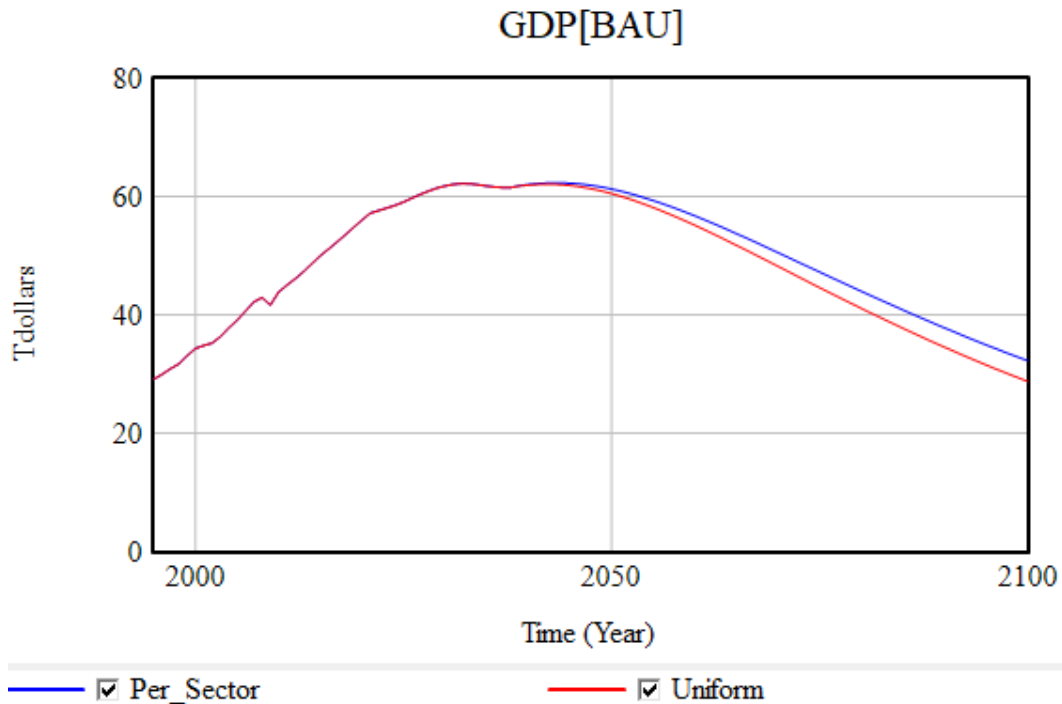
Para poder ver cómo han intervenido los daños climáticos sectoriales estimados en este trabajo en el devenir del bienestar económico mundial, se hace necesario realizar una simulación del modelo con los impactos uniformes del cambio climático para todos los sectores y, después, realizar otra simulación con la modalidad “per sector” y asignando las funciones de daño calculadas a cada uno de los tres sectores analizados. De este modo, se pueden comparar los resultados obtenidos en ambas situaciones.

En un primer momento, se selecciona solamente el escenario BAU en el comando “Subscripts”. Después, se acude al Excel “inputs_W” y, en la pestaña “BAU” del mismo, se activan los impactos climáticos y la opción “sector-uniform”. Una vez realizado el paso anterior, se selecciona la función de daño 3 en la casilla de elección para el caso de daños sectoriales uniformes. Con ello, se simula el modelo en VENSIM y a esa simulación se le adjudica el nombre “Uniform”. Seguidamente, se vuelve a ir al Excel “inputs_W” y se activan los daños climáticos junto con la opción “per sector” en la pestaña “BAU”, seleccionando la función de daño más robusta calculada para cada sector estudiado (polinómica para agricultura y turismo y logarítmica para transporte terrestre) y la función de daños medios (3) al resto de sectores. Las funciones de daño descartadas en agricultura y transporte terrestre serán estudiadas en un análisis de sensibilidad posterior. Dicho esto, se vuelve a simular el modelo en VENSIM y a esta simulación se la llama “Per_sector”.

Con todos los pasos descritos en el párrafo anterior se consiguen gráficos en los que se pueden comparar los resultados de las dos simulaciones a la vez, lo cual es muy útil para poder extraer conclusiones. Para observar cómo varía el PIB mundial entre ambas situaciones, se enfrentan en el Gráfico 9 los resultados obtenidos en las simulaciones del escenario BAU con daños climáticos uniformes y con impactos climáticos individualizados para los tres sectores estudiados dejando al resto con la ecuación 3.

Se debe aclarar, con respecto a la unidad monetaria representada en el gráfico, que 40 T\$ equivalen a 40.000.000.000.000 de dólares. Dicho esto, se observa que en el caso de seguir el camino marcado por el escenario de referencia BAU con impactos climáticos, el PIB mundial alcanzaría su pico más alto entre los años 2030-2045 para, después, descender bruscamente hasta alcanzar en el año 2100 niveles similares a los registrados en 1995.

Gráfico 9. “Uniform” VS “Per_Sector” para PIB mundial en el escenario BAU

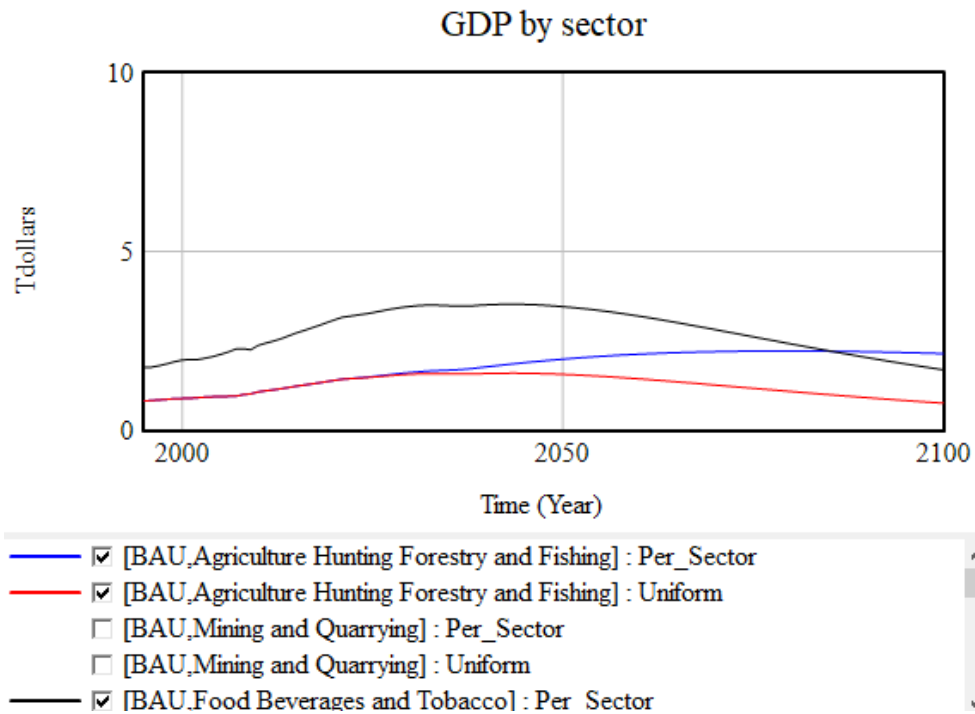


Fuente: Elaboración propia

Llama la atención que, en el caso de que el cambio climático afecte de manera individual a los tres sectores económicos estudiados y al resto de forma uniforme, el PIB es superior al registrado en la simulación con daños uniformes durante todo el descenso que experimenta desde el año 2045. Esto puede ser debido a que las funciones de daño sectoriales estimadas en este trabajo generan un porcentaje de pérdidas en la producción económica menor que el de la función de daños medios. Así, las producciones monetarias generadas por los tres sectores económicos analizados son superiores cuando se ven afectadas por las funciones de daño estimadas en este trabajo.

Para comprobarlo, en el Gráfico 10 se muestra la evolución temporal de las producciones económicas del sector agrario cuando los impactos económicos son uniformes y cuando estos afectan de manera individual. Para que el gráfico sea legible e interpretable, sólo se representan en él las evoluciones de los PIB de los sectores agrícola y “Comida, bebida y tabaco” (sector 3 en WIOD). El segundo de ellos representa al grupo de los sectores que se ven afectados por la función de daños medios en ambas simulaciones.

Gráfico 10. “Uniform” VS “Per_Sector” para PIB agrícola en el escenario BAU



Fuente: Elaboración propia

En la leyenda solamente se indica el color de la línea que representa la evolución de la producción económica del sector “Comida, bebida y tabaco” en la simulación “Per_Sector”. Esto se ha hecho así ya que, obviamente, las líneas obtenidas en ambos casos son iguales por el hecho de que la producción monetaria se ve afectada por la misma función de daño.

Centrándonos en el sector agrícola, se observa que su producción económica es mayor en el caso en el que se ve afectada por la función de daño que se le ha estimado en este trabajo. Este resultado respalda las conclusiones que se extrajeron anteriormente, las cuales hacían pensar que el PIB de la simulación “Per_Sector” era superior al del caso “Uniform” debido a que las funciones de daño calculadas generaban menores daños que la función de daños medios. Además, se observa que la evolución del PIB en el Gráfico 9 cambia notoriamente para sólo haberse modificado las funciones de daño de tres sectores, lo cual da una idea de lo que podría pasar cuando se consiguieran estimar las funciones de daño del total de los 35 sectores.

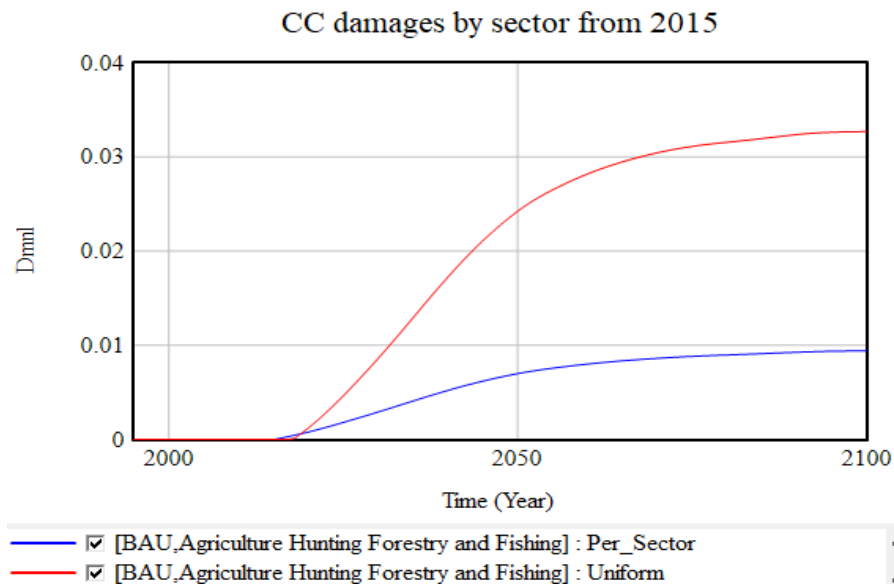
Llegados a este punto, sale a la luz la pregunta de por qué se ha elegido asignar la función de daños medios y no la de daños pequeños, la cual podría asemejarse mucho más a las calculadas en este documento para los tres sectores analizados. La primera respuesta radica en el hecho de que el término medio suele ser el que mejor representa al conjunto de elementos. Por otro lado, el segundo argumento que respalda la decisión se encuentra en que,

gracias a que esta función de daños genera unas pérdidas económicas sectoriales mucho mayores que las ecuaciones calculadas en este trabajo, se ha podido observar que los resultados cambian significativamente al calcular funciones de daño específicas para cada uno de los sectores.

Por último, es importante destacar que la forma que presentan los PIB sectoriales en el gráfico a lo largo del tiempo es similar, para la situación en la que el cambio climático afecta con la misma función de daños medios a todos los sectores, a la del PIB mundial en el Gráfico 9.

Para demostrar de manera definitiva que se está en lo cierto con respecto a las conclusiones extraídas, se hace necesario comprobar que, efectivamente, los daños infligidos con la función de daños del sector agrícola son menores que los provocados con la función de daños medios. Esto se ve en el Gráfico 11.

Gráfico 11. Pérdidas anuales en agricultura según simulación en BAU

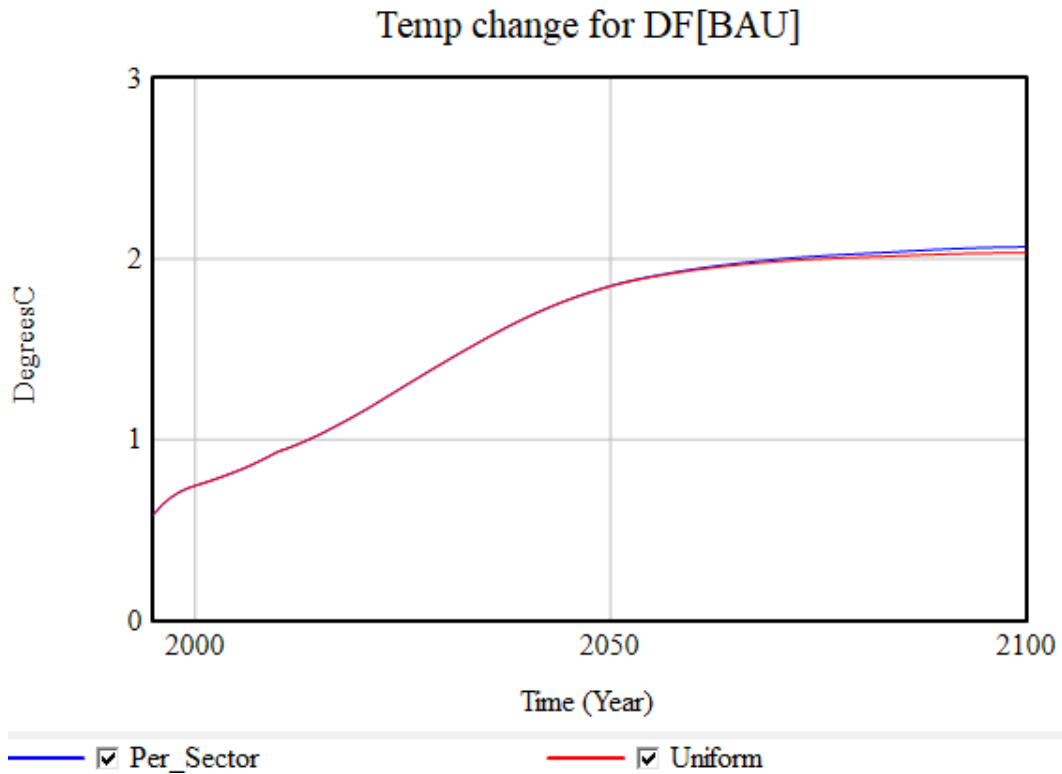


Fuente: Elaboración propia

El sector agrícola sufre un porcentaje de pérdidas anual mucho menor cuando se ve afectado por la función de daños calculada para él. Con ello se demuestra, una vez más, que la diferencia entre los PIB mundiales de las distintas simulaciones radica en que las funciones de daño sectoriales calculadas en este documento generan menos pérdidas que la función de daños medios.

Llama la atención, también, que el incremento de temperatura es mayor para la simulación “Per_Sector” (ver Gráfico 12). Esto se debe a que la actividad sectorial (producción) es mayor en el caso en el que los sectores se ven menos dañados por el clima y, debido a ello, se provoca un mayor cambio climático.

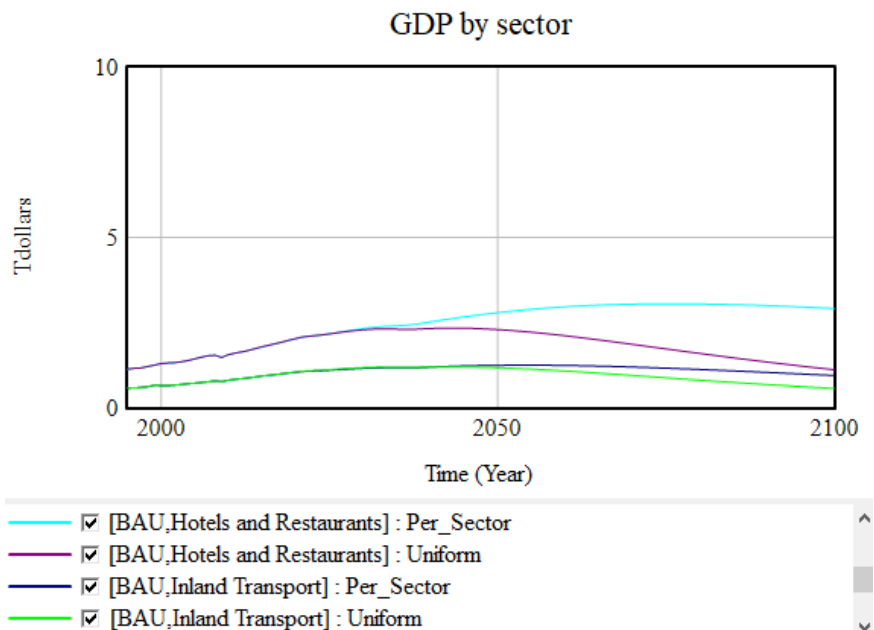
Gráfico 12. Incrementos de temperatura en las simulaciones de BAU



Fuente: Elaboración propia

Debido a que todas las comprobaciones se han realizado con el sector agrícola, se hace necesario ver qué ocurre con el resto (Gráfico 13).

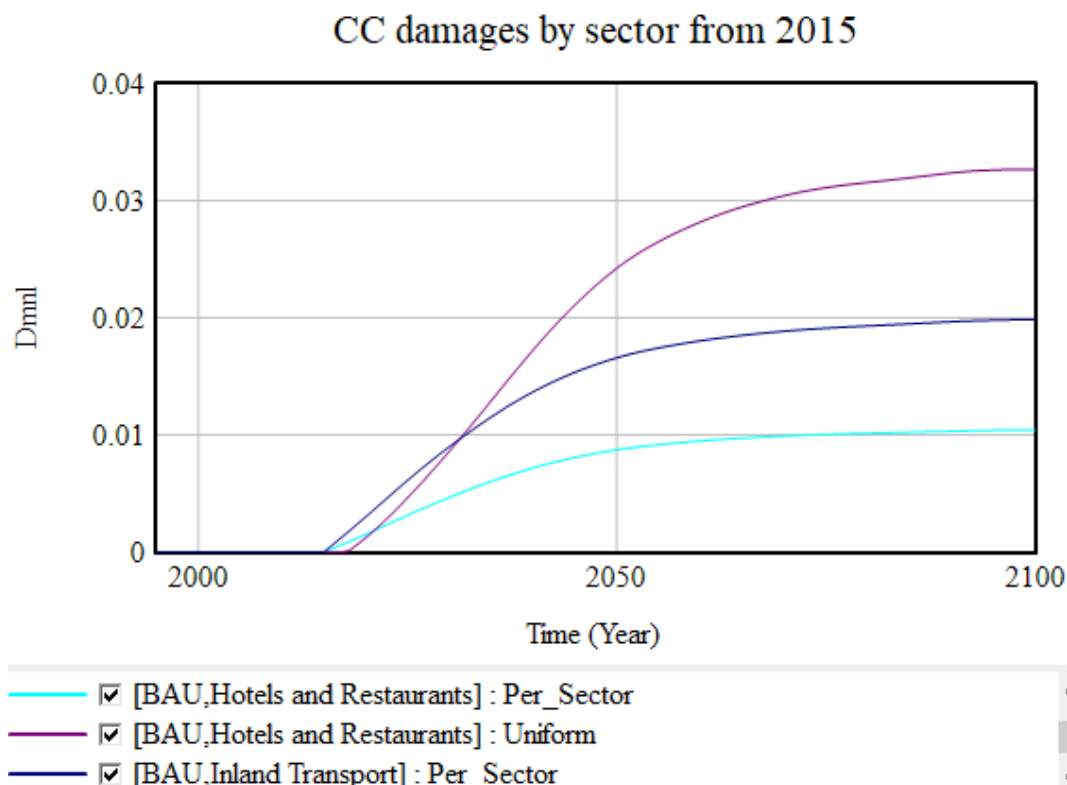
Gráfico 13. “Uniform” VS “Per_Sector” para PIB sectoriales en el escenario BAU



Fuente: Elaboración propia

Efectivamente, los sectores de turismo y de transporte terrestre sufren el mismo fenómeno que el sector agrícola. Sus PIB sectoriales son mayores cuando sus producciones se ven afectadas por las funciones de daño que han sido estimadas explícitamente para ellos en este trabajo. Además, los PIB resultantes tras aplicar la función de daños medios vuelven a tener un aspecto similar al del PIB mundial de la simulación “Uniform”.

Gráfico 14. Pérdidas anuales sectoriales según simulación en BAU



Fuente: Elaboración propia

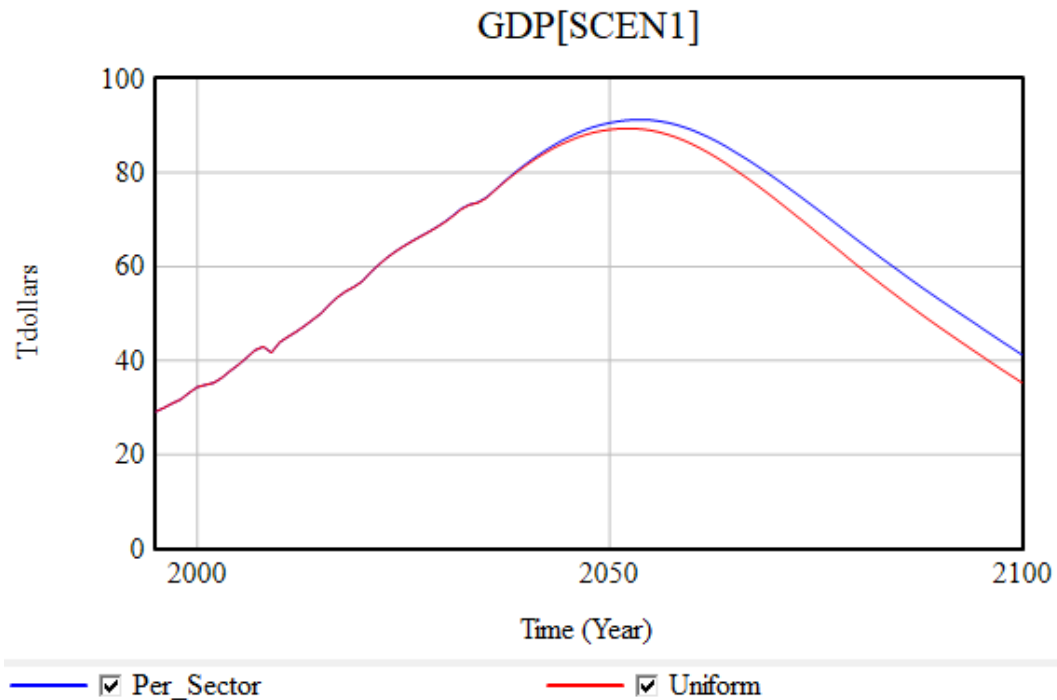
Los porcentajes de pérdidas anuales, reflejados en el Gráfico 14, vuelven a reafirmar el hecho de que el PIB mundial de ambas simulaciones cambia debido a las modificaciones que sufren las funciones de daño de estos tres sectores entre una situación y la otra.

8.2.2 Influencia de las funciones de daño en el Escenario 1

Para analizar cómo influyen las funciones de daño en el desarrollo temporal del PIB mundial dentro del Escenario 1, se realizan dos simulaciones con configuraciones similares a las que se hicieron para el escenario BAU. El único paso que se debe realizar de forma distinta es que, los diversos cambios que se realizan en el Excel “inputs_W”, ahora se implementan en la pestaña “SCEN1” en vez de en la hoja “BAU”.

Dicho esto, se selecciona el escenario “SCEN1” en el comando “Subscripts” de VENSIM y se simulan cada una de las dos distintas configuraciones (“Uniform” y “Per_Sector”). El primer resultado que se extrae es el que se muestra en el Gráfico 15.

Gráfico 15. “Uniform” VS “Per_Sector” para PIB mundial en el Escenario 1

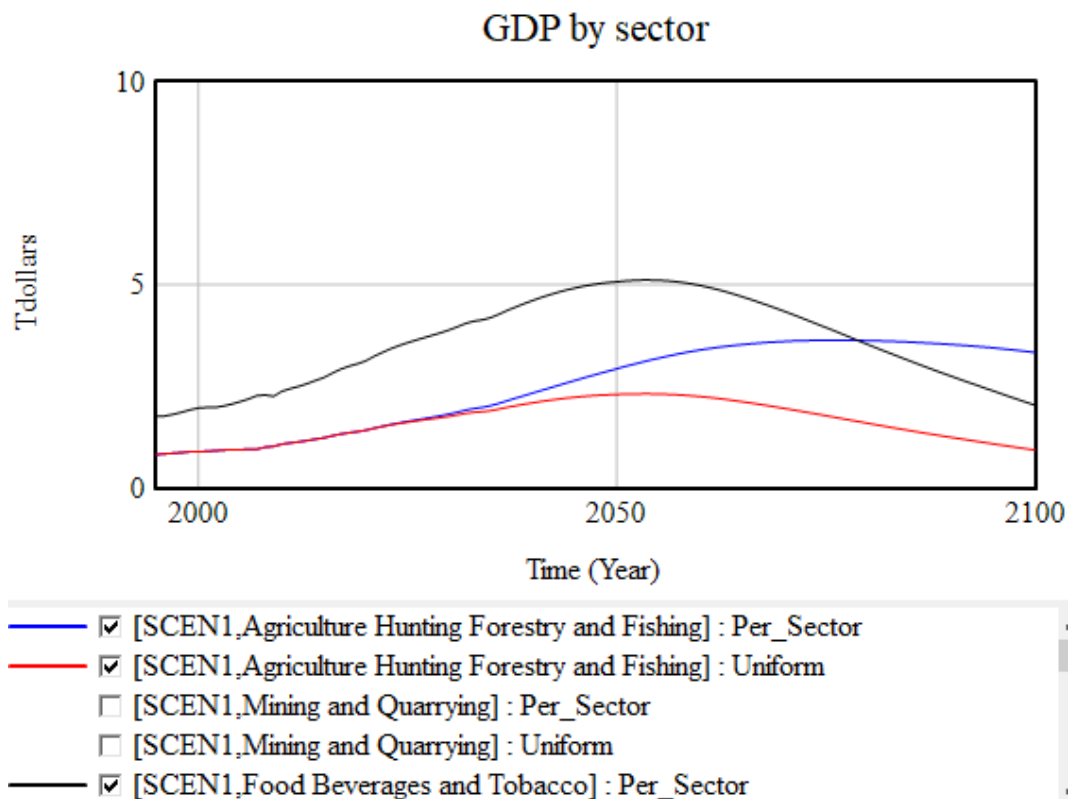


Fuente: Elaboración propia

La evolución del PIB mundial es distinta a la que se observó para el escenario BAU, ya que ahora aumenta de forma rápida hasta alcanzar el pico máximo en un momento concreto, que es en torno al año 2055, para, después, sufrir un fuerte descenso hasta el año 2100. Sin embargo, vuelve a ocurrir que el PIB de la simulación en la que el cambio climático afecta de manera uniforme a los sectores, es algo inferior al PIB de la simulación en la que se introducen las funciones de daño explícitas de los tres sectores analizados en este documento. Esto es apreciable, de manera clara, en los años de la segunda mitad del siglo.

Para comprobar que este suceso vuelve a ocurrir debido a que las funciones de daño sectoriales calculadas ejercen un menor grado de impactos que la función de daños medios, se muestra el Gráfico 16. En él se observa, al igual que ocurría en el escenario BAU, que las líneas de producción sectoriales de la simulación “Uniform” son similares, en aspecto, a la línea temporal que presenta el PIB mundial.

Gráfico 16. “Uniform” VS “Per_Sector” para PIB agrícola en el Escenario 1

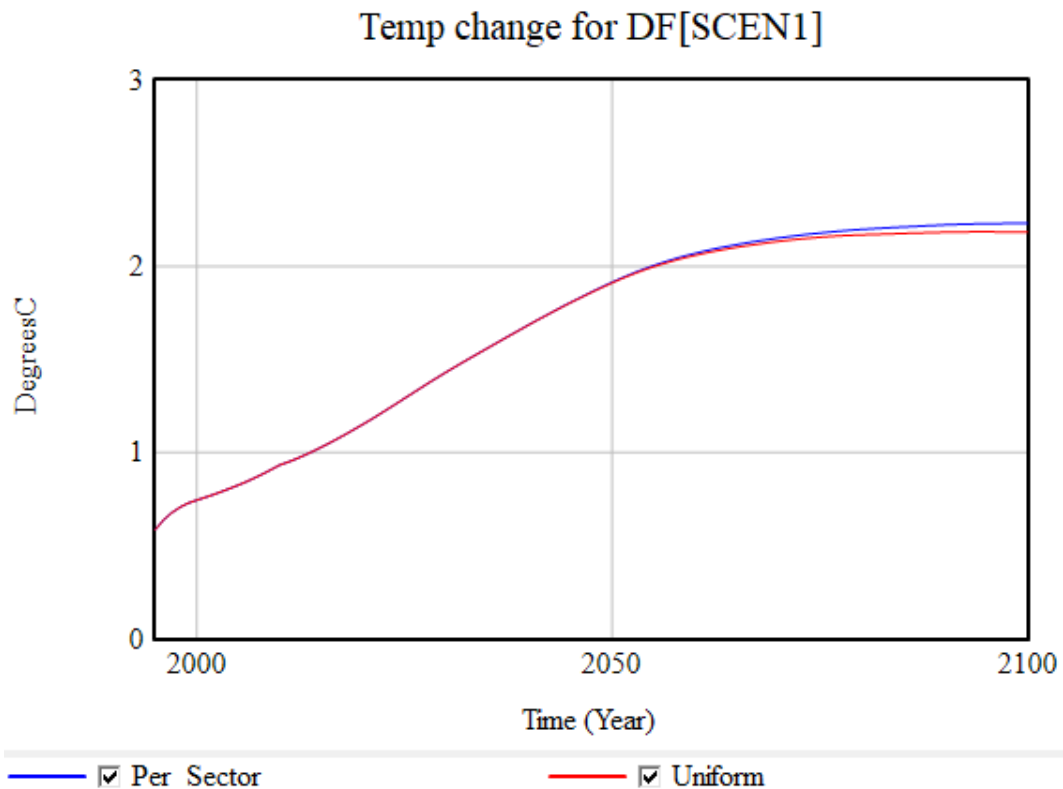


Fuente: Elaboración propia

Vuelve a suceder que los sectores estudiados en este trabajo tienen una mayor producción económica cuando se ven afectados por sus funciones de daño específicas que cuando les influye la ecuación de daños medios. Esto, como ya se comentó para el escenario BAU, es lo que provoca la variación entre los PIB de las distintas simulaciones, lo cual indica el grado en que cambiarían los resultados si se realizara para todos y cada uno de los 35 sectores WIOD y no solamente para tres de ellos.

Ahora, es necesario comprobar que, al igual que ocurrió con el escenario BAU, el incremento de la temperatura media global es más pronunciado en el caso en el que los daños climáticos afectan de manera específica a cada sector. Para ello, sólo hace falta observar el Gráfico 17.

Gráfico 17. Incrementos de temperatura en las simulaciones del Escenario 1

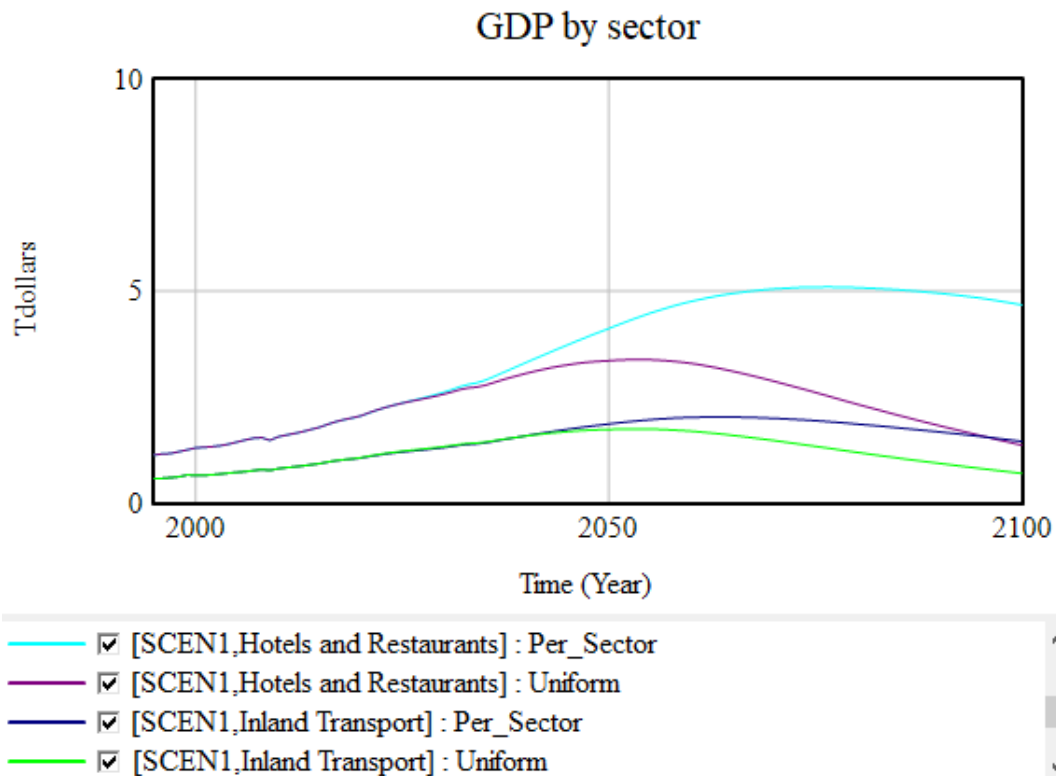


Fuente: Elaboración propia

Efectivamente, el incremento de temperatura vuelve a ser menor para la situación en la que todos los sectores económicos se ven afectados por la función de daños medios. Es un claro indicio de que, de nuevo, la mayor producción económica que experimentan los tres sectores analizados en este trabajo, debido a que el cambio climático produce menos impactos en su actividad que con respecto a la simulación “Uniform”, provoca que el cambio climático sea mayor en el caso “Per_Sector”.

Por último, queda por comprobar que los otros dos sectores estudiados en este documento presentan el mismo comportamiento que el sector de la agricultura. Esto volvería a dar más certeza a la conclusión extraída, la cual no es otra que la causa que provoca la diferencia entre los PIB mundiales de las dos simulaciones realizadas, es la menor cantidad de daños que sufren las producciones de estos sectores cuando les afectan las funciones de daños calculadas específicamente para ellos. En el Gráfico 18 se demuestra, una vez más, que los PIB de estos sectores son menores para la situación en la que el cambio climático afecta de forma uniforme a todos los sectores. Además, la líneas de los PIB de la simulación “Uniform” siguen mostrando un aspecto similar al del PIB mundial de este mismo escenario.

Gráfico 18. “Uniform” VS “Per_Sector” para PIB sectoriales en el Escenario 1



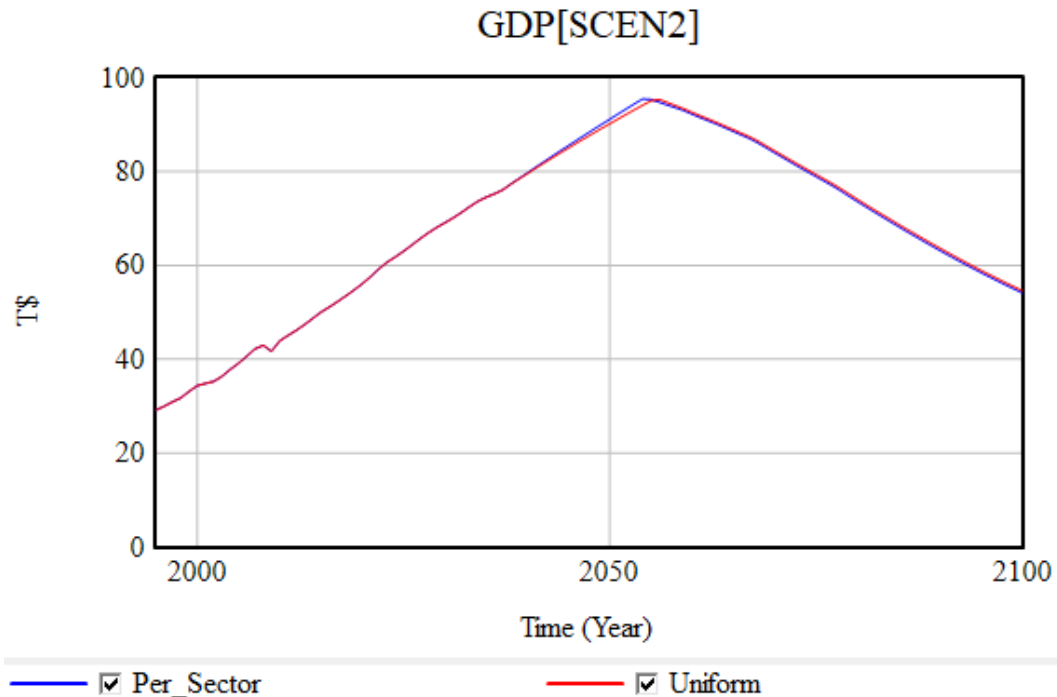
Fuente: Elaboración propia

8.2.3 Influencia de las funciones de daño en el Escenario 2

Para analizar cómo influyen las funciones de daño en el desarrollo temporal del PIB mundial dentro del Escenario 2, se realizan dos simulaciones con configuraciones similares a las que se hicieron para los escenarios BAU y Escenario 1. El único paso que se debe realizar de forma distinta es que, los diversos cambios que se realizan en el Excel “inputs_W”, ahora se implementan en la pestaña “SCEN2” en vez de en las hojas “BAU” y “SCEN1”.

Dicho esto, se selecciona el escenario “SCEN2” en el comando “Subscripts” de VENSIM y se simulan cada una de las dos distintas configuraciones (“Uniform”, y “Per_Sector”). El primer resultado que se extrae es el que se muestra en el Gráfico 19.

Gráfico 19. “Uniform” VS “Per_Sector” para PIB mundial en el Escenario 2

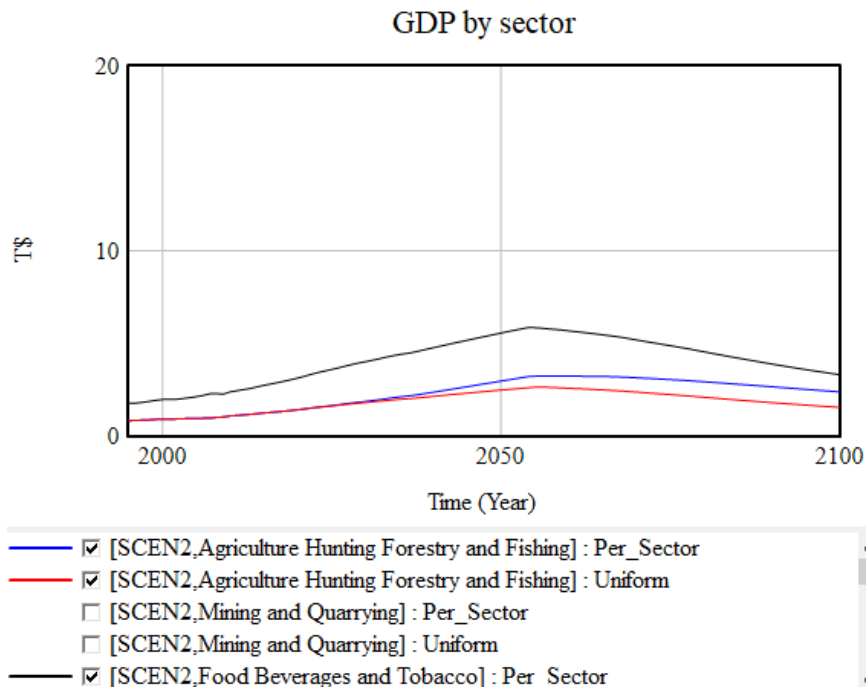


Fuente: Elaboración propia

Se observa que el aspecto que muestra la evolución temporal del PIB mundial en el Escenario 2 es muy similar a la del Escenario 1, alcanzando el pico máximo en torno a la mitad del siglo para, tras ello, disminuir hasta finales de siglo, aunque de manera menos pronunciada. Sin embargo, no se repite lo sucedido en los dos escenarios analizados anteriormente, ya que el PIB de la simulación “Per_Sector” es prácticamente idéntico al de la situación en la que el cambio climático afecta de manera uniforme a todos los sectores. De este modo, se hace necesario analizar si los PBI sectoriales sufren el mismo cambio que en los otros escenarios y, por lo tanto, este resultado distinto del PIB mundial se debe a la configuración propia de este escenario en el modelo.

Si se analiza el Gráfico 20, se aprecia que el sector agrícola, el cual sufre modificación de su función de daño entre una simulación y otra, muestra el mismo comportamiento que tenía en los otros escenarios. La simulación “Per_Sector” genera más producción económica agraria que el contexto “Uniform”. Dicho esto, cabe pensar que es la propia configuración del escenario la que hace que los PIB mundiales sean tan similares y que, por tanto, los cambios que pueden generar las modificaciones de las funciones de daño sectoriales no son tan grandes como los de los otros escenarios. Para comprobar que esta suposición es verdad, se debe de comprobar que el incremento de temperatura no varía de una situación a otra, lo cual explicaría que el escenario absorbe las alteraciones de las funciones de daño.

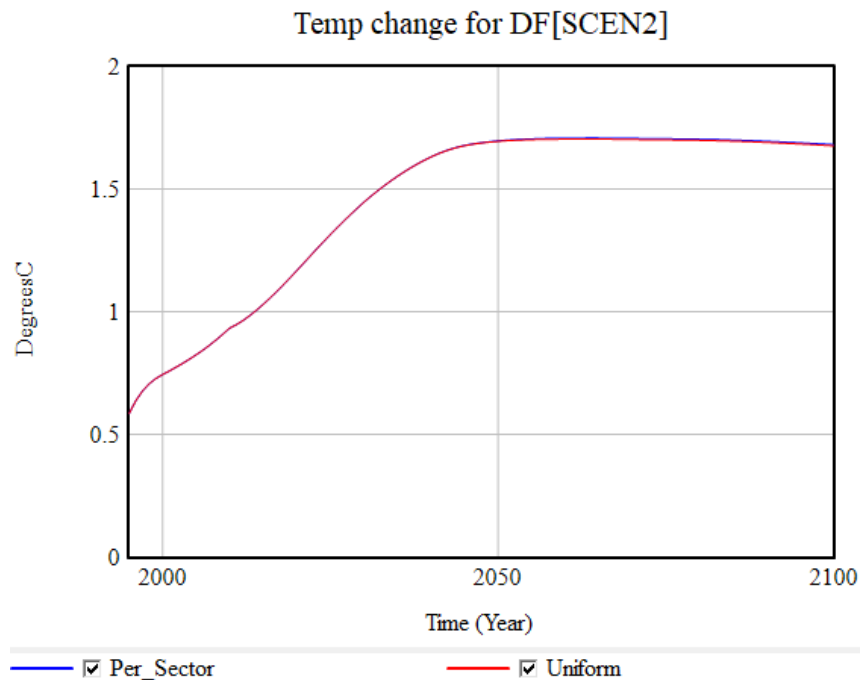
Gráfico 20. “Uniform” VS “Per_Sector” para PIB agrícola en el Escenario 2



Fuente: Elaboración propia

En el Gráfico 21 se observa que, efectivamente, el incremento de temperatura es el mismo en ambas simulaciones.

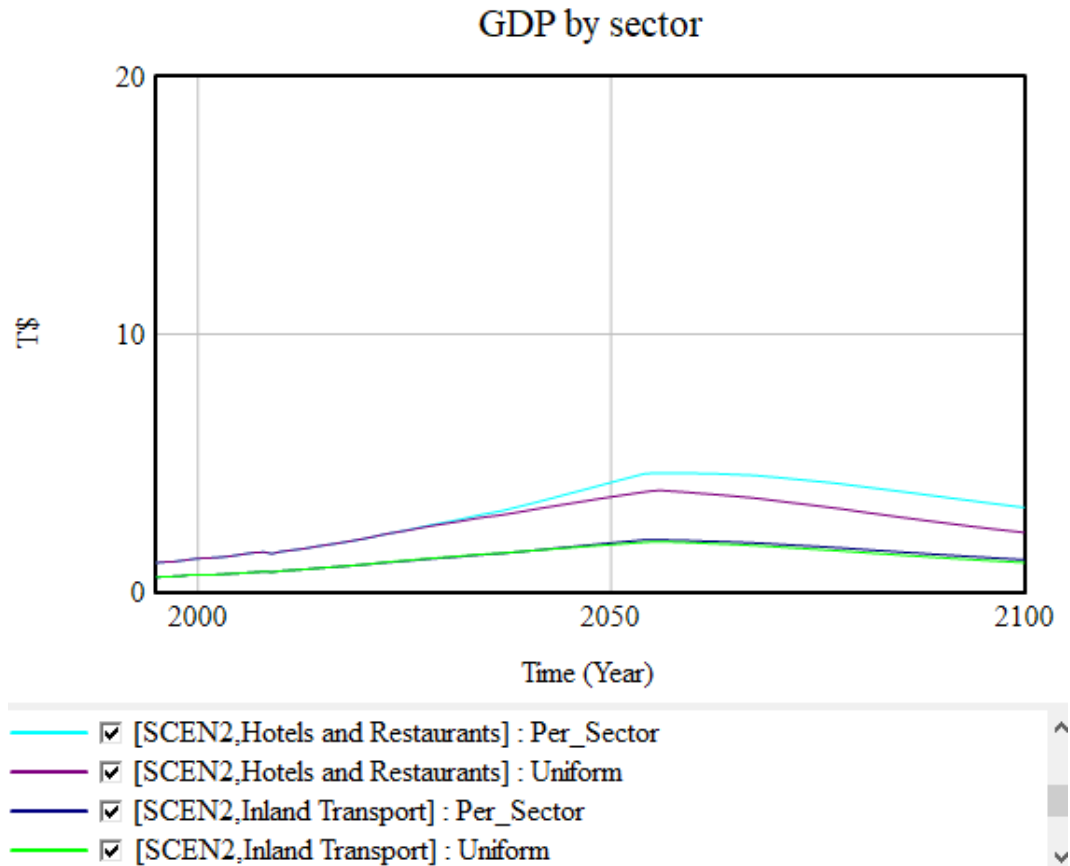
Gráfico 21. Incrementos de temperatura en las simulaciones del Escenario 2



Fuente: Elaboración propia

Por último, en el Gráfico 22 se observa que los otros dos sectores estudiados en este trabajo también tienen una mayor producción económica en la simulación “Per_Sector”, aunque para el sector del transporte terrestre la diferencia es casi nula. Esto corrobora lo anteriormente dicho.

Gráfico 22. “Uniform” VS “Per_Sector” para PIB sectoriales en el Escenario 2



Fuente: Elaboración propia

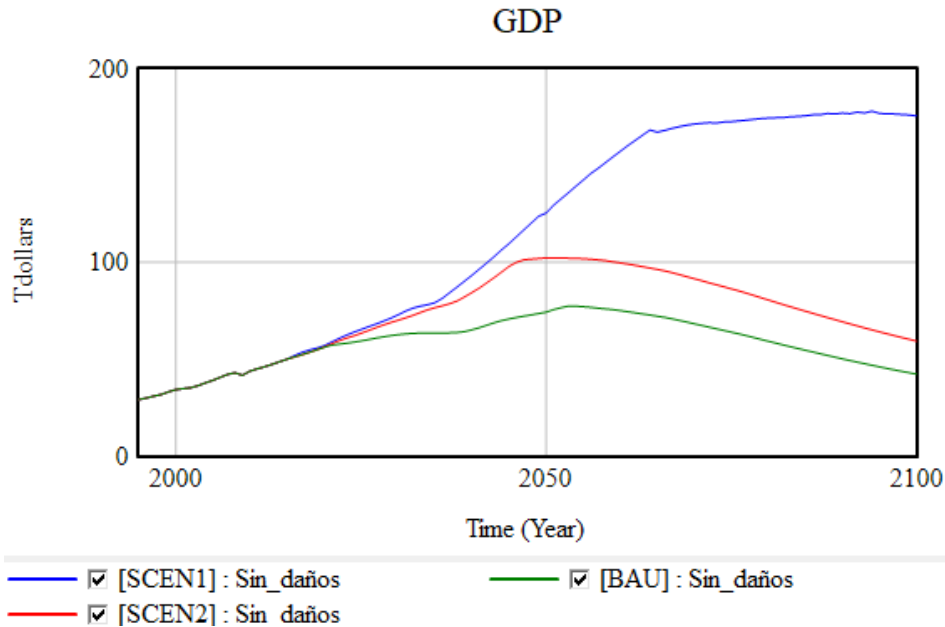
8.2.4 Comparación de los tres escenarios

La conclusión que se ha extraído de los análisis que se han realizado sobre los escenarios por separado es que, para poder observar la verdadera influencia de las funciones de daño en ellos, todos los sectores deben verse afectados por ecuaciones de impactos específicamente calculadas para ellos. Por lo tanto, las comparaciones de los parámetros en los distintos escenarios se harán incluyendo las tres funciones de daño sectoriales estimadas.

Una primera simulación necesaria es en la que los impactos climáticos no tienen ninguna influencia en el devenir de los escenarios. Con ella, se posee una línea de referencia en la que medir cómo influye el cambio climático cuando las funciones de daño son activadas. Así, se desactivan las funciones de daño en todas las ventanas del Excel “inputs_W” referidas a los distintos escenarios para, seguidamente, seleccionar a los tres escenarios en el

comando “Subscripts” de VENSIM. Después, se simula el modelo y se obtiene, en el Gráfico 23, las evoluciones temporales que sufren los PIB en cada uno de los escenarios.

Gráfico 23. Comparación de PIB de los escenarios sin impactos climáticos



Fuente: Elaboración propia

Cuando los impactos climáticos no están activados, el PIB del Escenario 1 destaca de manera muy notoria sobre los otros dos y, además, no sufre una caída brusca en ningún momento. Por otro lado, los PIB de los escenarios BAU y SCEN2 muestran un aspecto parecido en el que aumentan sus valores hasta mediados de siglo para, después, sufrir ambos una bajada notable. Además, el escenario que posee un PIB menor en el año 2100 es el BAU. En la Tabla 11 se muestran los valores numéricos de los PIB de los tres escenarios a mediados y finales de siglo. Llama la atención que, en el año 2100, el PIB del escenario 1 triplica al del Escenario 2, el cual ocupa la segunda posición.

Tabla 11. Valores de los PIB de los escenarios sin impactos climáticos

Time (Year)	2048	2049	2050	2051	2052
GDP[SCEN1] : Sin_daños	120.375	123.878	125.526	129.494	132.757
GDP[SCEN2] : Sin_daños	101.728	102.045	102.36	102.267	102.248
GDP[BAU] : Sin_daños	72.8963	73.6063	74.3465	75.6181	76.6204

Time (Year)	2096	2097	2098	2099	2100
GDP[SCEN1] : Sin_daños	176.695	176.636	176.387	176.16	175.645
GDP[SCEN2] : Sin_daños	63.1739	62.1993	61.2369	60.2935	59.3636
GDP[BAU] : Sin_daños	45.2802	44.5213	43.769	43.0277	42.2995

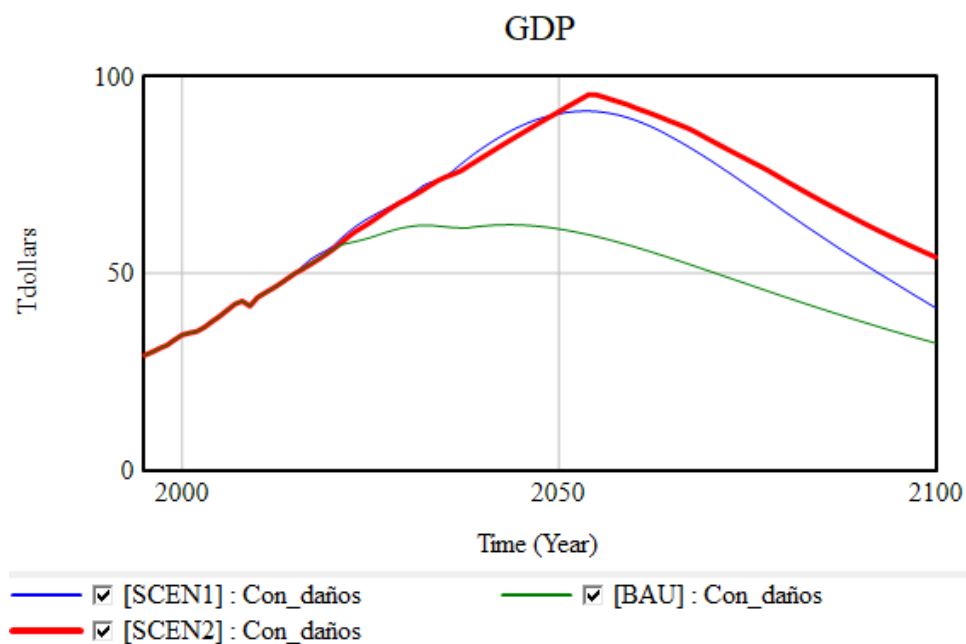
Fuente: Elaboración propia

Una vez analizado el contexto en el que no existen daños climáticos, se debe analizar cómo se modifican los resultados obtenidos cuando los impactos climáticos entran en acción. Para ello, se activan las funciones de daño y la opción “per sector” en cada uno de los tres escenarios en el Excel “inputs_W”. Es importante señalar que se asignan las funciones de daño más robustas a cada uno de los tres sectores estudiados en este TFG (polinómica a agricultura y turismo y logarítmica a transporte terrestre) y, al resto, la función de daños medios (opción 3). Dicho esto, se vuelven a seleccionar a los escenarios BAU, SCEN1 y SCEN2 en el comando “Subscripts” de Vensim y, seguidamente, se vuelve a simular el modelo.

Los resultados obtenidos se muestran en el Gráfico 24. Cuando los impactos climáticos entran en escena la situación cambia por completo. Ahora, el escenario que posee el PIB más alto a finales de siglo es el SCEN2. El Escenario 1, el cual no sufría ningún descenso brusco y destacaba ampliamente sobre el resto, ahora se ve abocado a la segunda posición con un descenso notable de su economía desde mediados de siglo. Por último, el escenario BAU no ve mejorada su situación con respecto al resto cuando los daños climáticos se activan y se mantiene en tercer lugar.

La lectura que se obtiene al respecto es que, a la larga, el camino que mejor situación económica aporta es el de la sostenibilidad. Sin embargo, si continuamos con el mismo rumbo que el actual nos encaminamos a estar en la peor situación de las tres, lo cual es una llamada de atención muy preocupante.

Gráfico 24. Comparación de PIB de los escenarios con impactos climáticos



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 12 se muestran los valores de los PIB de los distintos escenarios a mediados y finales de siglo cuando los daños climáticos sí que influyen. El Escenario 2 lidera con un escaso margen el ranking de las economías en torno al año 2050. Sin embargo, a finales de siglo esa ventaja es bastante más amplia y se coloca en torno a los 13 T\$.

Tabla 12. Valores de los PIB de los escenarios con impactos climáticos

Time (Year)	2048	2049	2050	2051	2052
GDP[SCEN1] : Con_daños	89.6822	90.1797	90.5768	90.9103	91.1305
GDP[SCEN2] : Con_daños	88.9218	90.0297	91.1267	92.2429	93.3342
GDP[BAU] : Con_daños	61.8332	61.5875	61.3009	60.976	60.6161

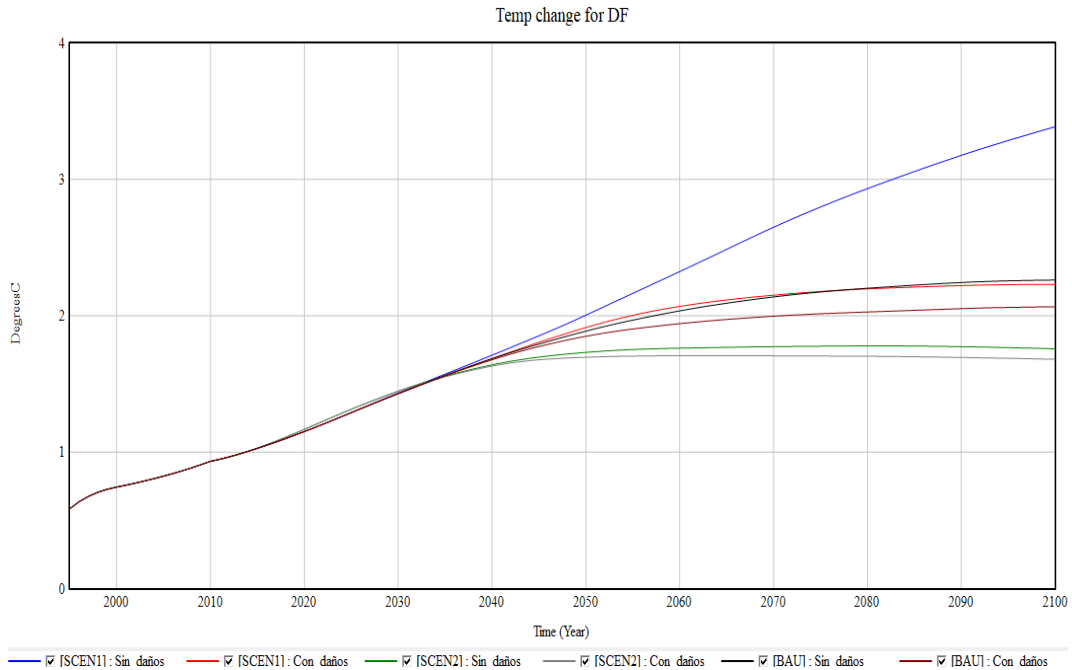
Time (Year)	2096	2097	2098	2099	2100
GDP[SCEN1] : Con_daños	45.8435	44.6678	43.5063	42.3573	41.2114
GDP[SCEN2] : Con_daños	57.5678	56.6878	55.8184	54.9612	54.1169
GDP[BAU] : Con_daños	34.407	33.8623	33.3258	32.7971	32.2766

Fuente: Elaboración propia

Otro parámetro importante a la hora de comparar los resultados de los distintos escenarios es el incremento de temperatura, el cual queda registrado en el Gráfico 25. Obviamente, y como ya se ha comentado en apartados anteriores de este documento, la temperatura media global de los tres escenarios es menor cuando los impactos climáticos actúan en mayor grado. Esto se debe a que los sectores económicos disminuyen su actividad debido a las pérdidas que les provoca el clima ocasionando, con ello, una menor degradación al medio ambiente. Además, el escenario en el que menos aumenta la temperatura es el SCEN2, lo cual coincide con el hecho de que representa el camino sostenible y el contexto en el que los impactos climáticos generan menos daños.

Centrándose en el Escenario 2, se observa que sus incrementos de temperatura son los que menos varían de una situación a otra. Este hecho provoca que los cambios que pueden producir las modificaciones de las funciones de daño serán menores que los de otros escenarios, ya que la dimensión de los impactos varía en función del aumento de temperatura. Esto explica lo comentado en el estudio que se hizo de manera individual al Escenario 2, en el que los PIB sectoriales cambiaban al introducir las funciones de daño estimadas en este trabajo, pero, sin embargo, sus efectos en el PIB mundial eran prácticamente nulos. En aquel caso, y como se pudo apreciar en el Gráfico 21, el incremento de temperatura apenas sufrió modificaciones.

Gráfico 25. Incrementos de temperatura en los tres escenarios



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 13 se representan los valores numéricos de los incrementos de temperatura en los distintos escenarios y contextos a finales de siglo. El Escenario 2 es el único que consigue mantenerse entre los valores de +1.5°C y +2°C, lo cual le hace ser el que más cumple con el objetivo fijado en la cumbre climática de París.

Tabla 13. Incrementos de temperatura al final del siglo en los tres escenarios

Time (Year)	2096	2097	2098	2099	2100
Temp change for DF[SCEN1] : Sin_daños	3.30643	3.32676	3.34682	3.36663	3.38623
Temp change for DF[SCEN1] : Con_daños	2.22976	2.23032	2.23076	2.23109	2.23131
Temp change for DF[SCEN2] : Sin_daños	1.76574	1.76403	1.76224	1.76039	1.75848
Temp change for DF[SCEN2] : Con_daños	1.6877	1.68631	1.68488	1.68342	1.68193
Temp change for DF[BAU] : Sin_daños	2.25843	2.25978	2.26093	2.2619	2.2627
Temp change for DF[BAU] : Con_daños	2.06325	2.06432	2.06529	2.06617	2.06696

Fuente: Elaboración propia

A modo de conclusión, cabe resaltar que, según los resultados obtenidos con las simulaciones realizadas del modelo MEDEAS-W en Vensim, el camino a seguir sería el representado por el Escenario 2. Con él, no sólo se obtendría una mejor situación económica a finales de siglo, sino que también se tendría un clima más agradable y un planeta menos desgastado y dañado. Además, el mayor incremento de temperatura perjudica más a los países considerados como cálidos y que, asimismo, da la casualidad de que también son los más

pobres. Por lo tanto, también es importante considerar que una mayor temperatura media global puede provocar una más grande desigualdad social.

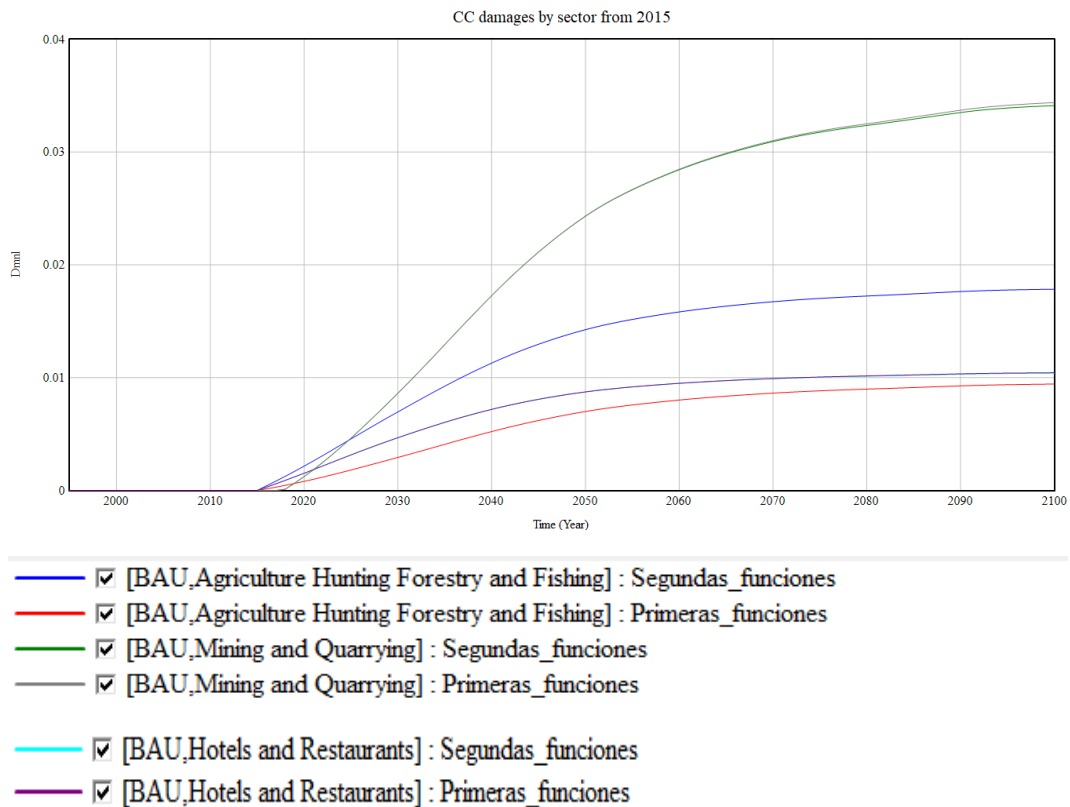
8.3. Análisis de sensibilidad

No se puede olvidar que, en el apartado 6.2.2 de este mismo documento, se estimaron dos funciones de daño de similar robustez para cada uno de los sectores de agricultura y transporte terrestre. Por lo tanto, y como hasta ahora sólo se han utilizado las que poseían un poco más de robustez en cada caso (polinómica en agricultura y logarítmica en transporte terrestre), se debe estudiar cómo varían los resultados finales obtenidos si se implementan estas otras ecuaciones.

Para realizar este análisis, se decide utilizar un único escenario para observar, de manera ordenada y clara, cómo varían los resultados finales. Para ello, se elige el escenario de referencia BAU en el comando “Subscripts” de VENSIM y se realizan dos simulaciones. En la primera de ellas, llamada “Primeras_funciones”, se activan los impactos climáticos del escenario y se selecciona la opción “per sector” en el Excel “inputs_W” para, por último, asignar las funciones de daño que mayor índice de correlación tienen a cada uno de los tres sectores estudiados en este TFG. Al resto de sectores se les sigue fijando la función de daños medios. Con respecto a la segunda simulación, la cual es llamada “Segundas_funciones”, se configura el Excel “inputs_W” igual que en el caso anterior salvo que, ahora, se les asignan las funciones de daños que menor grado de correlación poseían a cada uno de los sectores analizados en este trabajo.

En el Gráfico 26 se muestran los diferentes porcentajes de daños anuales que reportan las dos funciones de daño seleccionadas para el sector de la agricultura. Además, también se representan las ecuaciones de daño del sector turístico y del sector “Minas y canteras”, el cual representa a los sectores dañados por la función de daños medios. Como para los sectores del turismo y de la minería se emplean las mismas ecuaciones en ambos casos, sólo se representan una línea de porcentajes de daños para cada uno de ellos. Se puede apreciar, también, que todas las proyecciones de porcentajes de daños tienen un aspecto similar al que presenta el incremento de temperatura en el sector BAU con daños del Gráfico 25, lo cual es lógico porque sus valores varían en función del aumento de temperatura.

Gráfico 26. Comparación de las dos funciones de daño del sector agrícola

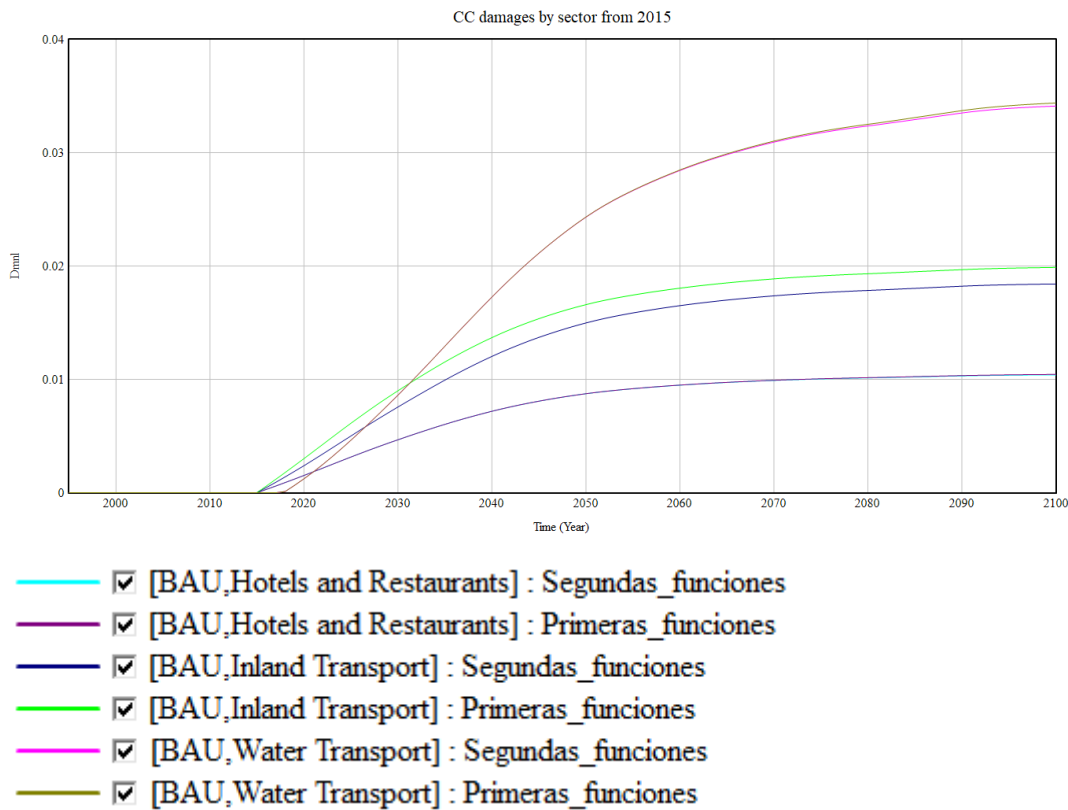


Fuente: Elaboración propia

A modo de observación, se observa que la función de daños medios destaca muy por encima de las demás. Con respecto a las ecuaciones del sector agrícola, la función lineal estima el doble daños que la función logarítmica en el último cuarto de siglo. Esto debe verse reflejado en la evolución del PIB a lo largo del siglo para el escenario BAU.

En el Gráfico 27 se muestra la misma información que en el anterior, pero ahora cambiando las funciones de daño del sector agrícola por las del transporte terrestre. La ecuación de daños medios vuelve a destacar muy por encima del resto. Entre las ecuaciones de daño del transporte terrestre no hay una diferencia tan grande como la que existía entre las del sector agrícola, aunque sí que se observa que la logarítmica el algo superior a la polinómica. Esa pequeña variación también debería de influir algo en el desarrollo del PIB durante el siglo.

Gráfico 27. Comparación de las funciones de daño del transporte terrestre

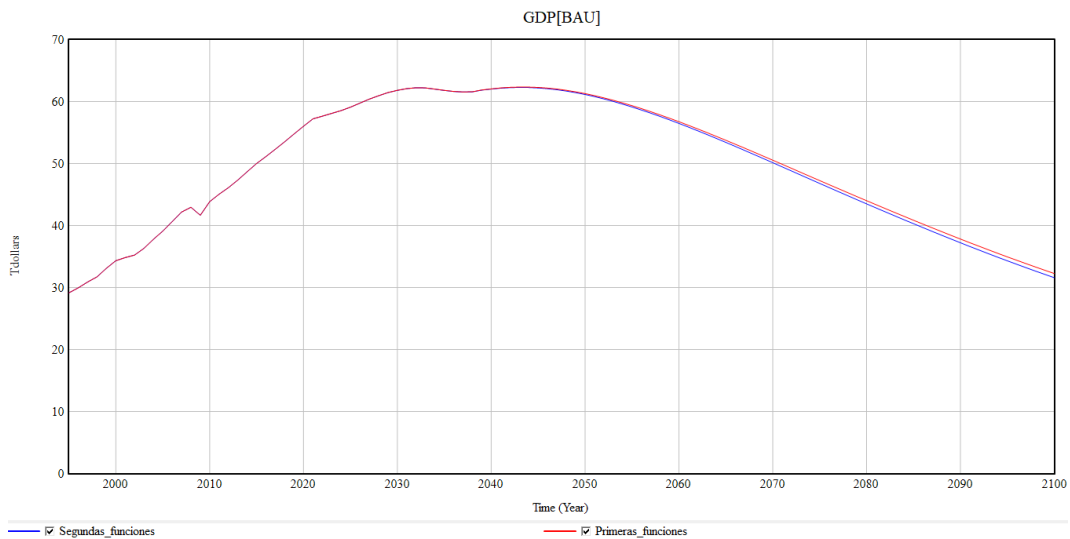


Fuente: Elaboración propia

Si ahora se observa la evolución temporal del PIB de ambas situaciones en el escenario BAU, la cual se muestra en el Gráfico 28, se aprecia que el PIB obtenido implementando las funciones de daño que más correlación poseen es algo superior al conseguido con las “Segundas_funciones”. Este hecho encaja perfectamente con que las primeras ecuaciones generaban un menor porcentaje de daños en total que las segundas.

Cabe destacar que esta variación la ha provocado el cambio de dos funciones de daño de entre las 35 que hay en total. Esto quiere decir que si se consiguen estimar correctamente las ecuaciones de cada uno de los sectores se obtendrían, seguramente, unos resultados muy distintos a los cosechados, pero también se ajustarían mucho más a la realidad. Se ha comprobado, también, que las tres funciones de daño de los sectores estudiados en este trabajo son bastante inferiores en valores devueltos que la ecuación de daños medios, por lo que se puede intuir que el total de pérdidas no sería tan abultado. Dicho esto, se llega a la conclusión de que, para obtener unos resultados precisos, se deben conseguir unas funciones de daño relativamente exactas de todos y cada uno de los sectores.

Gráfico 28. Análisis de sensibilidad de las distintas funciones de daño en BAU



Fuente: Elaboración propia

Ya que en el gráfico es difícil apreciar cuál es el valor aproximado de esta diferencia, en la Tabla 14 se representan numéricamente los PIB de los últimos cuatro años de cada situación. La divergencia se sitúa en torno a los 0.6T\$, lo cual es una cifra significativa para sólo haber modificado las funciones de daño de dos sectores.

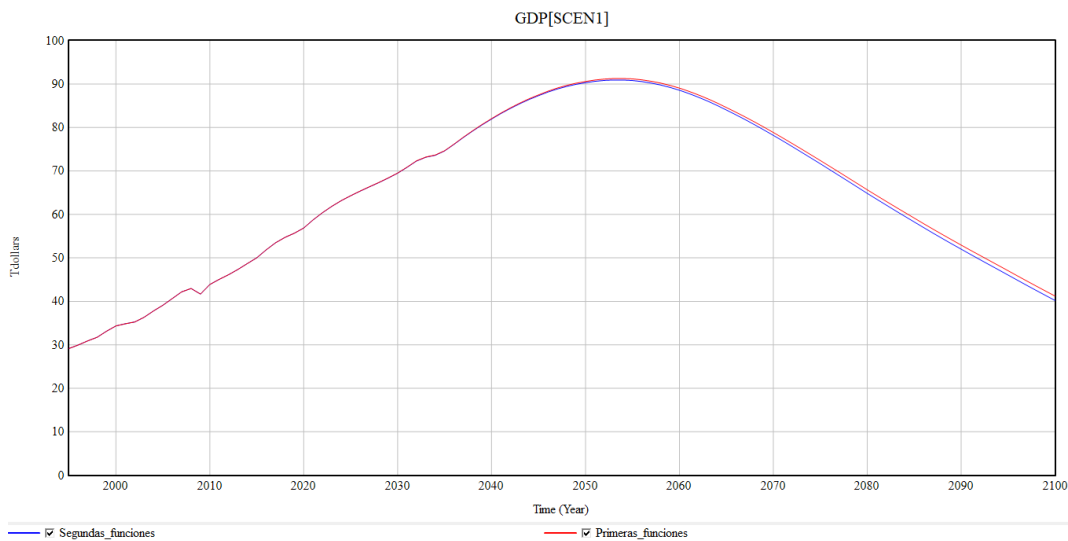
Tabla 14. Valores de los PIB según distintas funciones de daño en BAU

Time (Year)	2097	2098	2099	2100
GDP[BAU] : Segundas_funciones	33.2076	32.664	32.1282	31.6006
GDP[BAU] : Primeras_funciones	33.8623	33.3258	32.7971	32.2766

Fuente: Elaboración propia

Para poder reafirmar las conclusiones extraídas con las simulaciones realizadas en el escenario BAU, se debe comprobar que ocurren los mismos fenómenos en los otros dos escenarios. En el Gráfico 29 se muestra la evolución temporal de los PIB en las situaciones de “Primeras_funciones” y “Segundas_funciones” para el Escenario 1. Vuelve a ocurrir que existen unas pequeñas diferencias entre ambos en los últimos años del siglo, y que las funciones de daño que tienen una mayor correlación producen un PIB más elevado que las otras. Por lo tanto, ya se ha verificado que ocurren los mismos hechos para los escenarios BAU y SCEN1.

Gráfico 29. Sensibilidad de las distintas funciones de daño en el Escenario 1



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 15 se muestra que la diferencia de PIB entre ambos escenarios a final de siglo para el Escenario 1 oscila en torno a los 1T\$, lo cual es bastante más que lo registrado en el escenario BAU. Esto se debe a que la temperatura media global máxima en el Escenario 1 es superior a la del escenario BAU, lo cual provoca que la diferencia de los daños ejercidos por las distintas funciones se haga más grande.

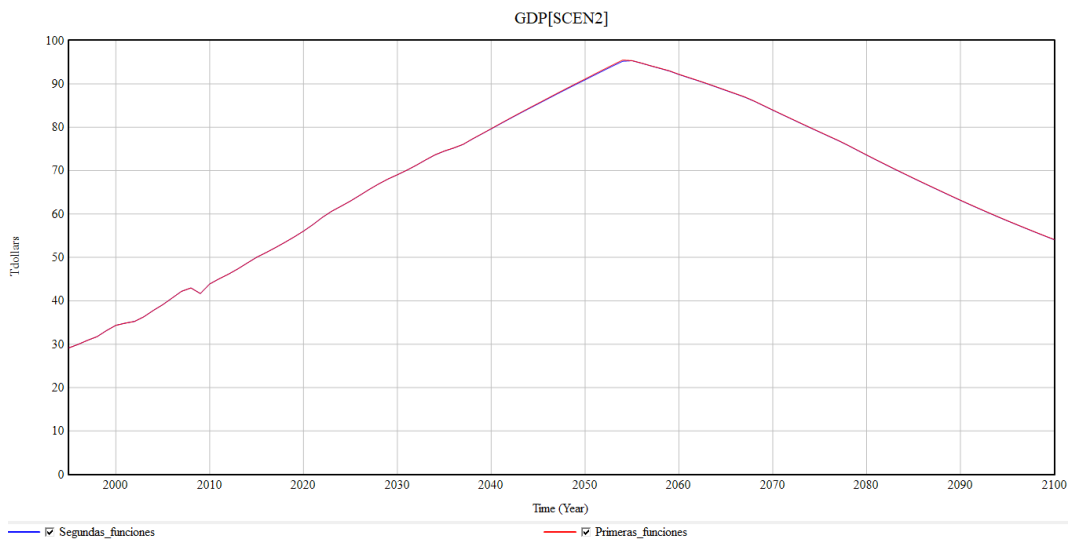
Tabla 15. Valores de los PIB según distintas funciones de daño en Escenario 1

Time (Year)	2097	2098	2099	2100
GDP[SCEN1] : Segundas_funciones	43.6647	42.4974	41.3431	40.1927
GDP[SCEN1] : Primeras_funciones	44.6678	43.5063	42.3573	41.2114

Fuente: Elaboración propia

Para el Escenario 2 se registran los PIB a lo largo del tiempo en el Gráfico 30. En él no se aprecia una diferencia de valores entre las dos situaciones simuladas, por lo que hace que se deba acudir a la comparación de los valores numéricos. De todos modos, el hecho de que sea el escenario que posee la menor temperatura media global provoca que las diferencias entre los porcentajes de impactos climáticos suministrados por las funciones de daño sean las más pequeñas de todas, lo cual ya se ha comentado anteriormente en este documento.

Gráfico 30. Sensibilidad de las distintas funciones de daño en el Escenario 2



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 16 se puede comprobar que, de nuevo, las funciones de daño que más valor de correlación poseen generan un PIB superior a finales de siglo. También se vuelve a cumplir que, para una menor temperatura media global, las diferencias de producción económica entre ambas situaciones se reducen.

Tabla 16. Valores de los PIB según distintas funciones de daño en Escenario 2

Time (Year)	2097	2098	2099	2100
GDP[SCEN2] : Segundas_funciones	56.6486	55.7797	54.9227	54.0787
GDP[SCEN2] : Primeras_funciones	56.6878	55.8184	54.9612	54.1169

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, se llega a la conclusión de que, para obtener unos resultados precisos, se deben conseguir unas funciones de daño relativamente exactas para todos y cada uno de los sectores. Además, los cambios que se observarán en los resultados generales del modelo serán más notorios en aquellos escenarios en los que la temperatura media global es más elevada.

8.4. Comparación de resultados con la literatura revisada

Es relevante poder comparar los resultados obtenidos en este trabajo con los que han extraído otros autores de la literatura que se ha revisado. Con ello, se puede tener una idea de dónde se encuentran ubicados los resultados logrados en este estudio dentro de la investigación de los efectos del cambio climático. Además, es importante resaltar que los valores de pérdidas derivados de los impactos climáticos varían mucho de un estudio a otro, y que también

dependen en gran medida del método de estimación empleado y de los datos utilizados.

Dicho esto, se comienza con una búsqueda de aquellos artículos empleados en la elaboración de este documento, cuyos resultados se puedan comparar con los obtenidos en este TFG. Por lo tanto, deben de ser estudios en los que se observe la variación de la economía mundial al incorporar los impactos del cambio climático en el dinamismo del modelo.

(Bosello, Eboli, & Pierfederici, 2012) estima que, para un incremento de 1.92°C comparado con niveles preindustriales, el PIB mundial podría tener unas pérdidas de aproximadamente 0.5% en 2050 comparado con un hipotético escenario en el que el cambio climático no ocurre. Utiliza un modelo de impactos climáticos integrados en donde la evaluación económica está basada en una aproximación CGE. Las entradas al modelo CGE provienen de un amplio, aunque todavía parcial, grupo de estudios de impactos ascendentes actualizados. Además, emplea una desagregación sectorial y regional.

En nuestro modelo, cuando se obtiene un incremento de temperatura en torno a 1.9°C, el Escenario 1 presenta unas pérdidas en el PIB de en torno a un 28%, mientras que en el escenario BAU son del 17.5%. Sin embargo, el Escenario 2 nunca llega a obtener un incremento de temperatura de 1.9°C, pero a finales de siglo consigue un incremento de 1.68°C que ocasionan unas pérdidas en el PIB del 8.8%. Todas estas pérdidas son en comparación con el PIB obtenido en estos escenarios cuando no actúan los impactos climáticos.

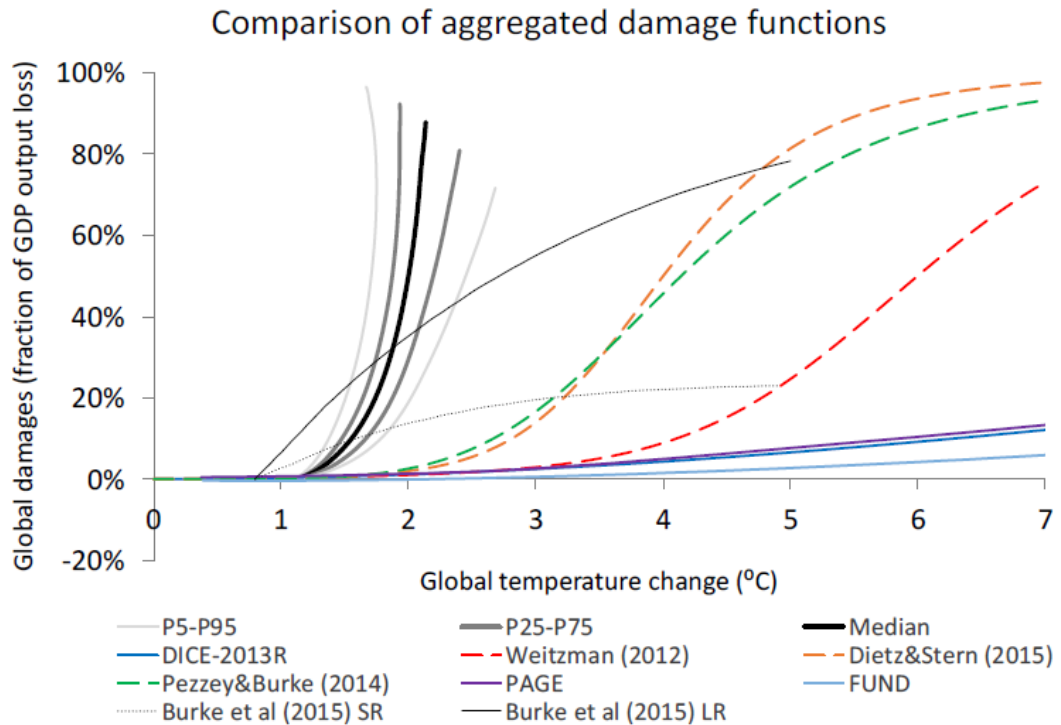
Esta comparación nos revela que existen unas grandes diferencias entre las estimaciones de ambos estudios, lo cual ya se advirtió al inicio de este apartado. Obviamente, existen grandes diferencias entre los modelos y las suposiciones utilizadas.

En (Diaz & Moore, 2017) se estiman los daños al PIB para varios modelos. Además, se realiza un análisis multisectorial y multirregional. En cuanto a resultados, para un incremento de temperatura de 2°C, no se supera el 1% de pérdidas en el PIB mundial para ninguno de los modelos utilizados. Como dato curioso, dos de los modelos utilizados en este artículo consiguen el 9% de daños registrado en el Escenario 2 de MEDEAS-W cuando el incremento de temperatura oscila los 6°C. De nuevo, se vuelven a observar diferencias significativas con respecto a los resultados que se han revisado en la literatura.

En la figura 3 de (Capellán Pérez & de Castro, 2019), la cual se encuentra representada en el Gráfico 31, se observan los porcentajes de daño al PIB mundial, en función del incremento de temperatura, obtenidos por diversos estudios y autores. Entre ellos se encuentran los ya vistos en (Diaz & Moore,

2017). De nuevo, y salvo con la estimación “Burke et al (2015) LR”, todas las pérdidas se encuentran muy por debajo en valor a las obtenidas en este TFG.

Gráfico 31. Diversas estimaciones de pérdidas del PIB según incremento de Tª



Fuente: (Capellán Pérez & de Castro, 2019)

Como conclusión de estas comparaciones, se obtiene que los daños estimados al PIB mundial en el presente TFG son muy superiores, en valor, a los que se han obtenido en diversos estudios de la literatura. Obviamente, y como ya se explicó en la sección 8.3 de este documento, las funciones de daño calculadas para los tres sectores analizados reportan unos porcentajes de impactos bastante inferiores a los que da la función de daños medios. Por lo tanto, si se estimaran funciones de daño para cada uno de los otros 32 sectores de la base de datos WIOD, seguramente se obtendrían unas pérdidas del PIB bastante inferiores y más en consonancia con las recopiladas de la literatura. Aun así, las diferencias vistas son tan elevadas que, seguramente, los resultados que se obtendrían seguirían siendo más altos que los reportados por la literatura.

No se debe olvidar que el Modelo MEDEAS introduce los daños de manera anual, lo cual genera unas pérdidas totales mayores que cuando se introducen los daños de forma absoluta (se aplica un porcentaje de pérdidas en un año concreto con respecto a un escenario sin cambio climático). Esta es otra de las razones que explican estas grandes diferencias con respecto a los resultados de la literatura.

9. CONCLUSIONES

El estudio previo que conlleva la realización de este Trabajo de Fin de Grado ha supuesto una profunda búsqueda de información en torno a la problemática que puede generar, en un futuro, el avance imparable del cambio climático. La actividad humana sin control está produciendo un incremento de los niveles de CO₂ en la atmósfera y de la temperatura media global, lo cual va a repercutir negativamente en el bienestar económico de la sociedad humana. El cómo proyectar los impactos climáticos en la producción económica de los sectores económicos a lo largo del tiempo, lo cual permite poder extraer conclusiones relevantes de cómo el cambio climático afecta al crecimiento del PIB mundial, ha supuesto el pilar fundamental de este trabajo.

En primer lugar, se ha explicado en qué consiste el modelo MEDEAS y su utilidad para poder estimar la influencia del cambio climático en el bienestar económico mundial. Se ha hecho un repaso de las distintas partes que componen este modelo y de su funcionamiento interno. Su papel es fundamental para la consecución de los objetivos de este TFG.

Debido a que en el modelo MEDEAS se utilizan la metodología input-output y la dinámica de sistemas, se han realizado diversos análisis de ambas. La primera de ellas, la metodología input-output, resulta ser el recurso empleado para poder representar los flujos monetarios que se dan entre los distintos sectores económicos. Con ella se obtiene la producción económica total que genera cada sector, el cual es el valor sobre el que se deben hacer actuar a los daños climáticos.

Con respecto a la dinámica de sistemas, es la metodología empleada para crear el modelo y, principalmente, establecer las relaciones de influencia entre las variables que lo componen. Con ella se puede observar cómo varían los resultados del modelo cuando se modifican ciertas variables del mismo, lo cual permite reconocer a aquellos elementos claves que poseen más importancia dentro del sistema estudiado. Además, el diagrama de flujos es el que permite plasmar el modelo en el ordenador de manera sencilla, hecho que hace que las simulaciones no supongan un problema difícil de implementar.

Tras ello, se hacía necesario estimar funciones de daño que reflejaran el porcentaje de pérdidas económicas sectoriales en función del incremento de temperatura. Debido a que el modelo MEDEAS emplea la base de datos WIOD, la cual está compuesta por 35 sectores económicos, se hacía imprescindible seleccionar cuáles de ellos iban a ser estudiados. El requisito que más se tuvo en cuenta en la elección fue que existieran un número suficiente de estimaciones en la literatura como para poder obtener unas ecuaciones de daño robustas. Aquí entraba en juego el realizar una profunda revisión literaria

en la que se consiguieran registrar los valores de daños sectoriales obtenidos en diversos estudios.

Una vez obtenidos dichos valores, se calcularon las funciones de daño de los sectores realizando regresiones con las estimaciones recopiladas en Excel. Después, se seleccionaron aquellas regresiones que más coeficiente de correlación tenían y se introdujeron en el modelo MEDEAS-W, el cual está constituido por una tabla de inputs en Excel y un diagrama de flujos en VENSIM.

Tras lo anterior, se modificaron varios parámetros en los dos archivos que lo componen y se realizaron varias simulaciones del modelo bajo distintos escenarios para obtener resultados. El trabajo realizado ha pasado por la manipulación del Excel de las entradas del modelo y por la modificación del modelo MEDEAS-W elaborado en VENSIM, además de realizar una profunda búsqueda de toda la información que ha sido necesaria para realizar este trabajo y que ha sido expuesta en los párrafos anteriores. Esto último ha resultado lo más complicado y tedioso, ya que es difícil encontrar estimaciones de daños climáticos a nivel mundial para los sectores económicos. Con respecto al software VENSIM, su rendimiento ha sido adecuado para poder llevar a cabo las simulaciones de modelos grandes como MEDEAS-W.

Los resultados obtenidos muestran que el cambio climático acarreará pérdidas en el PIB mundial a lo largo de este siglo. Además, se ha demostrado que el seguir caminos de desarrollo poco sostenibles es una mala opción, ya que cuando se introdujeron los impactos climáticos en el modelo se observó que el escenario que más PIB generaba a final de siglo era el que representaba la opción más verde.

Los resultados obtenidos en este TFG distan de ser los más correctos, ya que la función de daños medios reportaba muchos más daños que las calculadas para los tres sectores estudiados en este documento. Además, la correlación de las funciones de daño sectoriales estimadas no era muy alta, lo cual se debe, en parte, a que no se hizo distinción entre estimaciones literarias “anuales” y “absolutas”. Aun así, y sabiendo que el modelo MEDEAS-W genera más pérdidas climáticas que otros modelos debido a que los impactos afectan de manera anual, las conclusiones obtenidas son orientativas y relevantes.

Por lo tanto, se propone como posible continuación de este trabajo el obtener una función de daño concreta para cada sector económico y, de esta manera, obtener unos resultados más cercanos a la realidad. Además, se recomienda no aceptar tanta incertidumbre en los cálculos de estas funciones de daño. Con ello, las conclusiones que se extraigan poseerán una mayor robustez. También, resulta interesante el introducir los daños climáticos de manera “absoluta” y no “anual” para ver cómo cambian los resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- Amelung, B., & Moreno, Á. (Mayo de 2012). Costing the impact of climate change on tourism in Europe: results of the PESETA project. *Climatic Change*, 112, 83-100. doi:<https://doi.org/10.1007/s10584-011-0341-0>
- Bachner, G. (Marzo de 2017). Assessing the economy-wide effects of climate change adaptation options of land transport systems in Austria. *Regional Environmental Change*, 17(3), 929-940. doi:<https://doi.org/10.1007/s10113-016-1089-x>
- Bauer, N., Calvin, K., Emmerling, J., Fricko, O., Fujimori, S., Hilaire, J., . . . van Vuuren, D. (Enero de 2017). Shared Socio-Economic Pathways of the Energy Sector – Quantifying the Narratives. *Global Environmental Change*, 42, 316-330. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.07.006>
- Berrittella, M., Bigano, A., Roson, R., & S. J. Tol, R. (Octubre de 2006). A general equilibrium analysis of climate change impacts on tourism. *Tourism Management*, 27, 913-924. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tourman.2005.05.002>
- Bigano, A., Bosello, F., Roson, R., & S. J. Tol, R. (1 de Noviembre de 2006). Economy-Wide Estimates of the Implications of Climate Change: A Joint Analysis for Sea Level Rise and Tourism. *FEEM Working Paper(135)*, 32. doi:<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.944480>
- Bigano, A., Bosello, F., Roson, R., & S. J. Tol, R. (Octubre de 2008). Economy-wide impacts of climate change: a joint analysis for sea level rise and tourism. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 765-791. doi:<https://doi.org/10.1007/s11027-007-9139-9>
- Bosello, F., Eboli, F., & Pierfederici, R. (15 de Febrero de 2012). Assessing the Economic Impacts of Climate Change - An Updated CGE Point of View. *Fondazione Eni Enrico Mattei*, 29. Obtenido de https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2004966
- C Moore, F., Lantz C Baldos, U., & Hertel, T. (13 de Junio de 2017). Economic impacts of climate change on agriculture: a comparison of process-based and statistical yield models. *Environmental Research Letters*, 12(6). doi:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6eb2>
- Calzadilla, Á., Rehdanz, K., Betts, R., Falloon, P., Wiltshire, A., & S. J. Tol, R. (Septiembre de 2013). Climate change impacts on global agriculture.

- Climatic Change*, 120, 357-374. doi:<https://doi.org/10.1007/s10584-013-0822-4>
- Capellán Pérez, I., & de Castro, C. (Agosto de 2019). Consistent integration of climate change damages to human societies in integrated assessment modelling. *Energy Strategy Reviews*, 43.
- Capellán Pérez, Í., de Blas, I., Nieto, J., de Castro, C., Miguel, L., Carpintero, Ó., . . . Álvarez-Antelo, D. (25 de Febrero de 2020). MEDEAS: a new modeling framework integrating global biophysical and socioeconomic constraints. *Energy & Environmental Science*, 13, 986-1017. doi:10.1039/c9ee02627d
- Capellán -Pérez, I., Mediavilla, M., de Castro, C., Carpintero, Ó., & Miguel, L. (2014). Fossil fuel depletion and socio-economic scenarios: An integrated approach. *Energy*, 77, 641-666. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.09.063>
- Cervini Iturre, H. (2002). *Bases y aplicaciones del modelo insumo-producto*. México DF: AZCAPOTALCO. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11191/4516>
- Chinowsky, P., Helman, J., Gulati, S., Neumann, J., & Martinich, J. (Marzo de 2019). Impacts of climate change on operation of the US rail network. *Transport Policy*, 75, 183-191. doi:doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.05.007
- Chinowsky, P., Schweikert, A., Strzepek, N., Manahan, K., Strzepek, K., & Schlosser, C. (Marzo de 2013). Climate change adaptation advantage for African road infrastructure. *Climatic Change*, 345-361. doi:10.1007/s10584-012-0536-z
- Danish, Awais Baloch, M., & Suad , S. (20 de Enero de 2018). Modeling the impact of transport energy consumption on CO2 emission in Pakistan: Evidence from ARDL approach. *Environmental Science and Pollution Research*(25), 9461-9473. doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-018-1230-0>
- Davis, S., Lewis, N., Shaner, M., Aggarwal, S., Arent, D., Azevedo, I., . . . Chiang, Y.-M. (29 de Junio de 2018). Net-zero emissions energy systems. *Science* , 360, 11. doi:DOI: 10.1126/science.aas9793
- Dellink, R., Lanzi, E., & Chateau, J. (15 de Febrero de 2019). The Sectoral and Regional Economic Consequences of Climate Change to 2060. *Environmental and Resource Economics*, 72, 309-363. doi:<https://doi.org/10.1007/s10640-017-0197-5>

- Diaz, D., & Moore, F. (2 de Noviembre de 2017). Quantifying the economic risks of climate change. *Nature climate change*(7), 774-782. doi:<https://doi.org/10.1038/nclimate3411>
- Du, D., & Ng, P. (Abril de 2018). The impact of climate change on tourism economies of Greece, Spain, and Turkey. *Environ Econ Policy Stud*, 20, 431-449. doi:<https://doi.org/10.1007/s10018-017-0200-y>
- Epdata. (20 de Enero de 2020). Recuperado el 15 de Junio de 2020, de epdata.es: <https://www.epdata.es/datos/turismo-espana-mundo-datos-graficos/272>
- Galbusera, L., & Giannopoulos, G. (Septiembre de 2018). On input-output economic models in disaster impact assessment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 186-198. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.04.030>
- Giraud, G., Mc Isaac, F., & Bovari, E. (Mayo de 2018). Coping with Collapse: A Stock-Flow Consistent Monetary Macrodynamics of Global Warming. *Ecological Economics*, 147, 383-398. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.01.034>
- GRUPO BANCO MUNDIAL. (2019). Recuperado el 29 de Mayo de 2020, de BANCO MUNDIAL: <https://datos.bancomundial.org/indicador/NV.AGR.TOTL.ZS?end=2018&start=1995&view=chart>
- Hallegatte, S. (21 de Agosto de 2008). A Roadmap to Assess the Economic Cost of Climate Change with an Application to Hurricanes in the United States. *Hurricanes and Climate Change*, 361-386. doi:https://doi.org/10.1007/978-0-387-09410-6_19
- Hallegatte, S. (28 de Junio de 2008). An Adaptive Regional Input-Output Model and its Application to the Assessment of the Economic Cost of Katrina. *Risk Analysis*, 28, 779-799. doi:10.1111/j.1539-6924.2008.01046.x
- INE. (17 de Diciembre de 2019). Recuperado el 26 de Abril de 2020, de Instituto Nacional de Estadística: https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736177058&menu=resultados&idp=1254735576581
- IPCC 2018 *Global Warming of 1.5°C*. (2018). Obtenido de Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>
- J. Koetse, M., & Rietveld, P. (Mayo de 2009). The impact of climate change and weather on transport: An overview of empirical findings. *Transportation*

- Research Part D: Transport and Environment*, 14, 205-221.
doi:doi:10.1016/j.trd.2008.12.004
- Jenkins, K. (Diciembre de 2013). Indirect economic losses of drought under future projections of climate change: a case study for Spain. *Natural Hazards*, 69, 1967-1986. doi:https://doi.org/10.1007/s11069-013-0788-6
- Kousky, C. (Noviembre de 2014). Informing climate adaptation: A review of the economic costs of natural disasters. *Energy Economics*, 46, 576-592. doi:https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.09.029
- Lam, V., Cheung, W., Reygondeau, G., & Sumaila, U. (7 de Septiembre de 2016). Projected change in global fisheries revenues under climate change. *SCIENTIFIC REPORTS*(6), 8. doi:https://doi.org/10.1038/srep32607
- Luigi Ratti, M. (24 de Abril de 2017). The Economics of Natural Disasters: an overview of the current research issues and methods. *CERE Working Paper*, 32. doi:http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2957459
- Martín García, J. (2012). *DINAMICA DE SISTEMAS EJERCICIOS*. Barcelona.
- Martinich , J., & Crimmins, A. (Mayo de 2019). Climate damages and adaptation potential across diverse sectors of the United States. *Nature climate change*(9), 397-404. doi:https://doi.org/10.1038/s41558-019-0444-6
- MEDEAS. (2020). Recuperado el 10 de Abril de 2020, de MEDEAS: <https://www.medeas.eu>
- Mendelsohn, R., Dinar, A., & Dalfelt , A. (12 de Julio de 2000). Climate Change Impacts on African Agriculture. Obtenido de <https://pdfs.semanticscholar.org/0c41/f0d847a052761ead5a930cdee60523d73222.pdf>
- MOLDTRANS GROUP . (3 de Junio de 2015). Recuperado el 29 de Mayo de 2020, de Comunicación Moldtrans: <https://www.moldtrans.com/transporte-de-mercancias-los-mayores-exportadores-e-importadores-mundiales/>
- Monier, E., Paltsev, S., Sokolov, A., Chen, Y., Gao, X., Ejaz , Q., . . . Haigh, M. (13 de Febrero de 2018). Toward a consistent modeling framework to assess multi-sectoral climate impacts. *Nature communications*(9), 8. doi:https://doi.org/10.1038/s41467-018-02984-9
- Moore, W., Gomes, C., Alleyne, D., & Phillips, W. (Febrero de 2013). An assessment of the economic and social impacts of climate change on the tourism sector in the Caribbean.

- Nemry, F., & Demirel, H. (2012). Impacts of Climate Change on Transport: A focus on road and rail transport infrastructures. doi:10.2791/15504
- Neumann, J., Price, J., Chinowsky, P., Wright, L., Ludwig, L., Streeter, R., . . . Martinich, J. (2015). Climate change risks to US infrastructure: impacts on roads, bridges, coastal development, and urban drainage. *Climatic Change*, 131, 97-109. doi:10.1007/s10584-013-1037-4
- Nexotur. (6 de Marzo de 2019). Recuperado el 15 de Junio de 2020, de nexotur.com: <http://www.nexotur.com/noticia/101605/NEXOTUR/El-Turismo-representa-el-104-del-PIB-mundial.html>
- Nieto, J., Carpintero, Ó., Miguel, L., & de Blas, I. (Febrero de 2020). Macroeconomic modelling under energy constraints: Global low carbon transition scenarios. (ELSEVIER, Ed.) *Energy Policy*, 137. doi:https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111090
- OKUYAMA, Y. (2008). CRITICAL REVIEW OF METHODOLOGIES ON DISASTER IMPACT ESTIMATION. 27.
- ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL. (22 de Septiembre de 2019). Recuperado el 13 de Septiembre de 2020, de <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/el-clima-mundial-entre-2015-y-2019-se-ha-acelerado-el-cambio-clim%C3%A1tico>
- Perera, A., Nik, V., Chen, D., Scartezzini, J.-L., & Hong, T. (February de 2020). Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems. *Nature energy*(5), 150-159. doi:https://doi.org/10.1038/s41560-020-0558-0
- Pütz, M., Gallati, D., Kytzia, S., Elsasser, H., & Lardelli, C. (1 de Noviembre de 2011). Winter Tourism, Climate Change, and Snowmaking in the Swiss Alps: Tourist' Attitudes and Regional Economic Impacts. *Mountain Research and Development*, 4, 357-362. doi:http://dx.doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-11-00039.1
- Ramírez, P. (1992). El sistema de Leontief y su solución matemática. *Lecturas de Economía*(37), 127-147.
- Ren , X., Weitzel, M., O'Neill, B., Lawrence, P., Meiyappan, P., Levis, S., . . . Dalton , M. (Febrero de 2018). Avoided economic impacts of climate change on agriculture: integrating a land surface model (CLM) with a global economic model (iPETS). *Climate Change*(146), 517-531. doi:https://doi.org/10.1007/s10584-016-1791-1

- Rojas-Downing, M., Nejadhashemi, A., Harrigan, T., & Woznicki, S. (12 de Febrero de 2017). Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation. *Climate Risk Management*, 16, 145-163. doi:<https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.02.001>
- Rosen, R., & Guenther, E. (Febrero de 2015). The economics of mitigating climate change: What can we know? *Technological Forecasting and Social Change*, 91, 93-106. doi:<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2014.01.013>
- Roson, R., & Sartori, M. (Noviembre de 2015). Estimation of climate change damage functions for 140 regions in the GTAP9 database. 39. Obtenido de https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=4910
- Rosselló, J., & Santana, M. (Diciembre de 2012). Climate change and global international tourism: An evaluation for different scenarios. *DEA Working Paper*(52). Obtenido de https://dea.uib.es/digitalAssets/220/220588_w52.pdf
- Schewe, J., Gosling, S., Reyer, C., Zhao, F., Ciais, P., Elliot, J., . . . Huber, V. (1 de Marzo de 2019). State-of-the-art global models underestimate impacts from climate extremes. *Nature Communications*, 10(1005). doi:<https://doi.org/10.1038/s41467-019-08745-6>
- Stevanovic, M., Popp, A., Lotze-Campen, H., Dietrich, J., Muller, C., Bonsch, M., . . . Weindl, I. (24 de Agosto de 2016). The impact of high-end climate change on agricultural welfare. *Science Advances*, 2(8). doi:DOI: 10.1126/sciadv.1501452
- TANAKA, F. (2011). Applications of leontief's input-output analysis in our economy. Obtenido de http://reposit.sun.ac.jp/dspace/bitstream/10561/874/1/v45n1p29_tanaka.pdf
- Tarancón Morán, M. (2003). *Técnicas de análisis económico inputoutput*. Toledo: Editorial Club Universitario.
- Taseska, V., Markovska, N., & Callaway, J. (December de 2012). Evaluation of climate change impacts on energy demand. *Energy*, 48, 88-95. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.06.053>
- Unterberger, C. (19 de Agosto de 2018). How Flood Damages to Public Infrastructure Affect Municipal Budget Indicators. *Economics of Disasters and Climate Change*, 2, 5-20. doi:<https://doi.org/10.1007/s41885-017-0015-0>

- Vajjarapu, H., Verma, A., & Gulzar, S. (14 de Febrero de 2019). Adaptation Policy Framework for Climate Change Impacts on Transportation Sector in Developing Countries. *Transportation in Developing Economies*(5), 16. doi:<https://doi.org/10.1007/s40890-019-0071-y>
- Van Passel, S., Massetti, E., & Mendelsohn, R. (Agosto de 2017). A Ricardian Analysis of the Impact of Climate Change on European Agriculture. *Environ Resource Econ*, 67, 725-760. doi:DOI 10.1007/s10640-016-0001-y
- WIOD: *World Input-Output Database*. (2020). Recuperado el 13 de Abril de 2020, de WIOD: World Input-Output Database: <http://www.wiod.org/home>
- Zhang, R., Fujimori, S., Dai, H., & Hanaoka, T. (1 de Febrero de 2018). Contribution of the transport sector to climate change mitigation: Insights from a global passenger transport model coupled with a computable general equilibrium model. *Applied Energy*, 211, 76-88. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.103>

ANEXO 1. TABLAS Y GRÁFICOS

Tabla 17. Matriz input-output de España del año 2016 en millones de euros. Fuente: (INE, 2019)

	Agricultura, ganadería y caza	Silvicultura y la explotación forestal	Pesca, productos de la acuicultura y servicios de apoyo a la pesca	Industrias extractivas	Productos alimenticios; bebidas; tabaco manufacturado	Productos textiles, artículos de cuero y calzado	Madera y corcho, excepto muebles; cestería espartería	Papel	Impresión y reproducción de soportes grabados	Coque y productos de refinado de petróleo	Productos químicos	Productos farmacéuticos	Productos de caucho y plásticos	Otros productos minerales no metálicos	Metalurgia y productos metálicos	Productos metálicos, excepto maquinaria y equipo	Productos informáticos, electrónicos y ópticos	Equipo eléctrico	Maquinaria y equipo n.c.o.p.	Vehículos de motor, remolques y semirremolques
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	871,0	0,1	0,0	0,2	27.665,3	674,2	3,7	23,8	0,0	0,0	484,8	149,7	199,4	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	9,2	0,0
2	10,4	796,7	0,0	1,2	25,7	0,0	72,9	227,0	0,0	0,0	2,8	6,2	36,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0
3	0,0	0,0	44,6	0,0	203,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	3,0	53,1	94,0	2,6	0,3	71,3	1,7	16.960,4	420,0	12,1	2,8	965,5	2.091,3	102,1	0,3	445,3	22,0	77,8
5	7.371,8	0,7	164,3	20,5	23.595,3	194,5	0,1	58,8	0,0	8,8	291,1	285,0	2,0	0,1	0,0	0,2	0,2	1,7	10,6	0,0
6	7,8	0,0	40,6	1,4	24,6	4.335,3	0,4	52,4	0,2	0,0	98,6	45,2	170,3	10,8	2,9	10,3	0,0	9,4	8,3	463,4
7	23,7	0,0	12,9	32,0	275,0	15,5	1.860,2	87,3	9,0	0,0	41,5	17,6	68,1	108,4	146,2	65,7	0,0	44,4	110,2	9,4
8	3,5	0,0	0,3	3,5	1.800,5	181,0	184,5	3.877,8	417,2	0,0	271,3	146,9	204,6	153,9	70,7	144,7	4,5	89,4	64,9	41,7
9	0,0	0,0	0,0	0,3	416,4	11,2	2,0	2,6	751,2	0,0	329,3	405,1	49,7	16,8	30,2	70,4	0,0	28,5	95,7	35,4
10	466,4	11,7	174,3	66,8	66,2	19,3	47,2	10,5	9,0	989,7	763,3	0,0	135,5	0,0	140,6	14,9	0,0	64,6	26,7	27,3
11	2.205,2	6,3	19,0	95,3	954,1	462,1	223,1	600,6	187,6	85,7	10.709,6	1.222,6	2.112,9	916,8	751,8	586,4	48,3	281,6	133,5	1.484,8
12	124,3	0,0	2,8	0,3	173,2	1,1	0,1	0,9	1,0	0,0	148,7	724,5	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	1,1	0,0
13	278,4	0,0	16,4	14,1	2.066,9	246,0	120,4	185,6	188,9	0,0	874,9	277,6	3.559,5	294,3	184,8	110,5	43,0	545,5	247,9	2.930,8
14	2,1	0,0	0,0	166,8	1.056,7	29,9	54,7	1,6	37,4	0,7	345,6	75,2	87,2	1.596,5	343,9	56,7	2,0	185,2	21,3	596,3
15	0,0	0,0	1,9	23,7	45,5	16,1	3,8	19,5	71,7	0,1	36,8	11,3	14,7	88,6	5.079,4	6.904,0	18,9	1.567,5	1.945,5	4.128,9
16	594,6	0,1	8,3	30,7	802,7	126,9	27,2	37,8	23,1	0,1	267,9	42,2	267,7	37,8	1.952,6	3.765,6	161,1	1.086,2	1.313,4	5.801,0
17	3,0	0,0	6,0	1,9	0,9	4,8	0,0	0,0	36,0	0,0	0,0	59,8	0,2	0,3	0,0	38,4	741,9	273,4	171,6	1.566,6
18	24,1	0,0	7,6	5,1	15,2	5,2	0,6	0,1	4,4	0,0	3,8	0,0	0,1	31,7	77,4	52,5	302,5	1.850,7	1.090,0	1.516,1
19	88,6	0,0	16,1	94,2	131,9	14,3	43,4	68,9	103,7	660,5	57,6	182,2	83,3	67,5	119,6	108,0	45,3	94,1	2.644,1	1.258,9
20	1,7	0,0	15,2	1,0	0,0	2,5	7,7	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	113,3	33,8	17,2	125,7	2,8	431,3	143,3	18.226,6

Total demanda intermedia	Total gasto en consumo final	Gasto en consumo final de los hogares	Gasto en consumo final de las instituciones privadas sin fines de lucro	Gasto en consumo final de las Administraciones Públicas	Formación bruta de capital	Formación bruta de capital fijo	Variación de existencias y adquisiciones menos cesiones de objetos valiosos	Total exportaciones	Exportaciones Unión Europea	Exportaciones terceros Países
31.495,9	10.390,7	10.378,0	2,0	10,7	2.496,3	2.019,9	476,4	11.399,8	9.853,0	1.546,8
1.275,5	372,4	308,4	0,0	64,0	280,9	49,7	231,2	164,2	160,6	3,6
297,7	3.373,8	3.373,8	0,0	0,0	31,0	0,0	31,0	508,9	447,8	61,1
28.121,2	138,7	41,7	0,0	97,0	100,2	178,3	-78,1	1.834,6	1.066,5	768,1
53.265,7	57.470,9	57.458,0	12,9	0,0	1.413,2	0,0	1.413,2	23.123,8	15.428,3	7.695,5
7.710,7	21.858,5	21.858,0	0,0	0,5	354,2	17,5	336,7	15.310,5	10.187,2	5.123,3
5.292,3	357,1	351,4	5,7	0,0	37,6	34,8	2,8	1.156,6	798,0	358,6
10.339,3	3.015,4	3.000,9	0,0	14,5	86,0	0,0	86,0	3.561,0	2.407,3	1.153,7
5.777,3	6,6	0,8	5,8	0,0	8,6	0,0	8,6	66,1	37,5	28,6
12.343,0	10.161,7	10.161,7	0,0	0,0	809,6	0,0	809,6	10.099,9	4.479,8	5.620,1
32.782,7	6.953,5	6.953,5	0,0	0,0	136,8	0,0	136,8	18.350,0	11.022,7	7.327,3
7.184,6	13.235,7	5.816,5	0,0	7.419,2	68,1	0,0	68,1	8.402,5	4.985,3	3.417,2
18.092,2	2.030,2	2.026,3	3,9	0,0	196,4	82,7	113,7	6.136,7	4.528,3	1.608,4
12.592,3	351,7	351,7	0,0	0,0	-69,8	7,1	-76,9	4.802,3	2.563,4	2.238,9
24.732,2	3,8	3,8	0,0	0,0	63,8	13,3	50,5	10.223,6	7.036,4	3.187,2
23.639,9	560,2	529,9	30,3	0,0	4.533,2	4.311,9	221,3	6.361,5	4.041,5	2.320,0
8.835,4	4.387,5	4.386,6	0,0	0,9	6.002,8	5.985,4	17,4	4.215,1	2.628,0	1.587,1
13.151,5	3.674,5	3.674,5	0,0	0,0	2.324,4	2.499,4	-175,0	7.658,8	4.768,5	2.890,3
12.820,1	315,6	315,6	0,0	0,0	12.590,9	12.314,3	276,6	13.223,1	6.266,7	6.956,4
24.063,0	15.261,6	15.261,6	0,0	0,0	15.547,8	14.247,6	1.300,2	46.847,6	37.851,1	8.996,5

Total a precios básicos	20.175,1	960,5	1.165,7	2.007,8
Impuestos netos sobre los productos	191,4	1,2	11,7	45,9
Total a precios de adquisición	20.366,5	961,7	1.177,4	2.053,7
Consumos intermedios a precios de adquisición	20.366,5	961,7	1.177,4	2.053,7
Remuneración de los asalariados	3.021,7	258,3	691,2	787,1
Sueldos y salarios brutos	2.806,4	229,3	613,0	605,0
Cotizaciones sociales	215,3	29,0	78,2	182,1
Otros impuestos netos sobre la producción	-5.961,4	3,9	-13,2	-7,6
Excedente de explotación bruto/Renta mixta	28.156,2	756,3	871,8	679,4
Valor añadido bruto a precios básicos	25.216,5	1.018,5	1.549,8	1.458,9
Producción a precios básicos	45.583,0	1.980,2	2.727,2	3.512,6
Importaciones	10.199,7	112,8	1.484,2	26.682,1
Importaciones de la Unión Europea	4.186,9	84,8	1.067,6	1.303,2
Importaciones de terceros países	6.012,8	28,0	416,6	25.378,9
Oferta a precios básicos	55.782,7	2.093,0	4.211,4	30.194,7

Tabla 18. Recopilación de estimaciones de daños encontradas en la literatura para el sector agrícola (en la base de datos WIOD: 1. Agricultura, caza, pesca y silvicultura)

Daños a la producción en relación con el nivel de cambio climático	Método de estimación	Región	Referencia	Obtención del % de daños
5,03% cuando variación de temperatura = 1,9°C (absoluto)	ICES (basado en aproximación CGE), con escenario A1B	Mundial	Bosello, F., Eboli, F., & Pierfederici, R. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2004966	Media de los datos de la tabla 3
2,2% cuando variación de temperatura = 1°C (anual)	Varias metodologías, datos de GTAP9	Mundial	Roberto Roson and Martina Sartori https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=4910	Media de los valores de la tabla A4
4,1% cuando variación de temperatura = 2°C (anual)	Varias metodologías, datos de GTAP9	Mundial	Roberto Roson and Martina Sartori https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=4910	Media de los valores de la tabla A4
6,7% cuando variación de temperatura = 3°C (anual)	Varias metodologías, datos de GTAP9	Mundial	Roberto Roson and Martina Sartori https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=4910	Media de los valores de la tabla A4
7,2% cuando variación de temperatura = 4°C (anual)	Varias metodologías, datos de GTAP9	Mundial	Roberto Roson and Martina Sartori https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=4910	Media de los valores de la tabla A4
7,9% cuando variación de temperatura = 5°C (anual)	Varias metodologías, datos de GTAP9	Mundial	Roberto Roson and Martina Sartori https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=4910	Media de los valores de la tabla A4
2,5% cuando variación de temperatura = 3,1°C (anual)	Modelo MAGPIE, escenario SRES A2, comercio LIB	Mundial	Stevanović, M. et al DOI: 10.1126/sciadv.1501452	Estimación propia a partir de los datos del material complementario
0,9% cuando variación de temperatura = 1,8°C (anual)	Modelo MAGPIE, escenario SRES A2, comercio FIX	Mundial	Stevanović, M. et al DOI: 10.1126/sciadv.1501452	Estimación propia a partir de los datos del material complementario
1,9% cuando variación de temperatura = 2,78°C (anual)	Modelo MAGPIE, escenario SRES B1, comercio LIB	Mundial	Stevanović, M. et al DOI: 10.1126/sciadv.1501452	Estimación propia a partir de los datos del material complementario
0,66% cuando variación de temperatura = 1,7°C (anual)	Modelo MAGPIE, escenario SRES B1, comercio FIX	Mundial	Stevanović, M. et al DOI: 10.1126/sciadv.1501452	Estimación propia a partir de los datos del material complementario
2,1% cuando variación de temperatura = 3,22°C (anual)	Modelo MAGPIE, escenario SRES A1B, comercio LIB	Mundial	Stevanović, M. et al DOI: 10.1126/sciadv.1501452	Estimación propia a partir de los datos del material complementario
0,75% cuando variación de temperatura = 1,9°C (anual)	Modelo MAGPIE, escenario SRES A1B, comercio FIX	Mundial	Stevanović, M. et al DOI: 10.1126/sciadv.1501452	Estimación propia a partir de los datos del material complementario
0,12% cuando variación de temperatura = 1,51°C (absoluto)	Modelo CGE, escenario SRES A1	Mundial	Berrittella, M. et al https://doi.org/10.1016/j.tourman.2005.05.002	Estimación a partir de los datos de la tabla 5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19. Recopilación de estimaciones de daños encontradas en la literatura para el sector turístico (en la base de datos WIOD: 22. Hoteles y restauración)

Daños a la producción en relación con el nivel de cambio climático	Método de estimación	Región	Referencia	Obtención del % de daños
<i>0,08% cuando variación de temperatura = 1,9°C (absoluto)</i>	ICES (basado en aproximación CGE), con escenario A1B	Mundial	Bosello, F., Eboli, F., & Pierfederici, R. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2004966	Media de los datos de la tabla 3
<i>1,29% cuando variación de temperatura = 1°C (absoluto)</i>	Modelo NG&Zao	Mundial	Ding Du and Pin Ng https://doi.org/10.1007/s10018-017-0200-y	Datos de la tabla 3
<i>2,46% cuando variación de temperatura = 2°C (absoluto)</i>	Modelo NG&Zao	Mundial	Ding Du and Pin Ng https://doi.org/10.1007/s10018-017-0200-y	Datos de la tabla 3
<i>3,51% cuando variación de temperatura = 3°C (absoluto)</i>	Modelo NG&Zao	Mundial	Ding Du and Pin Ng https://doi.org/10.1007/s10018-017-0200-y	Datos de la tabla 3
<i>1,5% cuando variación de temperatura = 1°C (anual)</i>	Varias metodologías, datos de GTAP9	Mundial	Roberto Roson and Martina Sartori https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=4910	Media de los valores de la tabla A8
<i>1,8% cuando variación de temperatura = 2°C (anual)</i>	Varias metodologías, datos de GTAP9	Mundial	Roberto Roson and Martina Sartori https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=4910	Media de los valores de la tabla A8
<i>2,1% cuando variación de temperatura = 3°C (anual)</i>	Varias metodologías, datos de GTAP9	Mundial	Roberto Roson and Martina Sartori https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=4910	Media de los valores de la tabla A8
<i>2,2% cuando variación de temperatura = 4°C (anual)</i>	Varias metodologías, datos de GTAP9	Mundial	Roberto Roson and Martina Sartori https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=4910	Media de los valores de la tabla A8
<i>2,35% cuando variación de temperatura = 5°C (anual)</i>	Varias metodologías, datos de GTAP9	Mundial	Roberto Roson and Martina Sartori https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=4910	Media de los valores de la tabla A8
<i>2,74% cuando variación de temperatura = 2,5°C (absoluto)</i>	Modelo GTAP	Mundial	Bigano, A. et al http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.944480	Extraído de los datos de la tabla 5
<i>2,78% cuando variación de temperatura = 2,96°C (absoluto)</i>	datos mundiales de turismo, escenario A2	Mundial	Jaume ROSSELLÓ and Maria SANTANA https://dea.uib.es/digitalAssets/220/220588_w52.pdf	Media de los datos registrados en la tabla 2
<i>2,95% cuando variación de temperatura = 2,78°C (absoluto)</i>	datos mundiales de turismo, escenario B1	Mundial	Jaume ROSSELLÓ and Maria SANTANA https://dea.uib.es/digitalAssets/220/220588_w52.pdf	Media de los datos registrados en la tabla 2
<i>3,3% cuando variación de temperatura = 3,1°C (absoluto)</i>	datos mundiales de turismo, escenario B2	Mundial	Jaume ROSSELLÓ and Maria SANTANA https://dea.uib.es/digitalAssets/220/220588_w52.pdf	Media de los datos registrados en la tabla 2

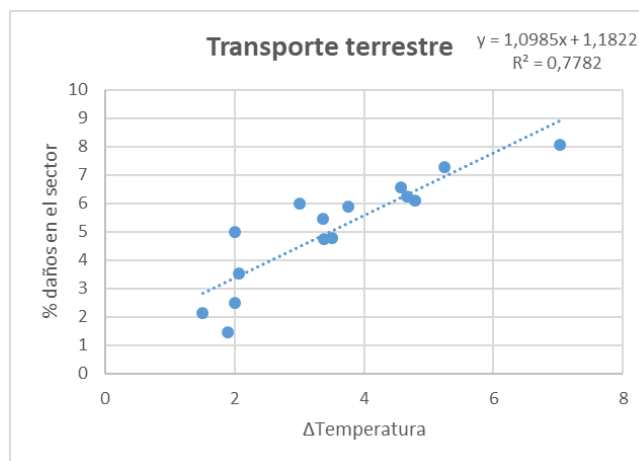
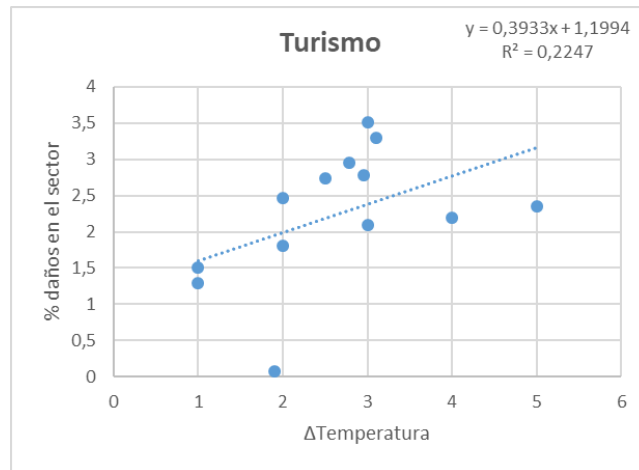
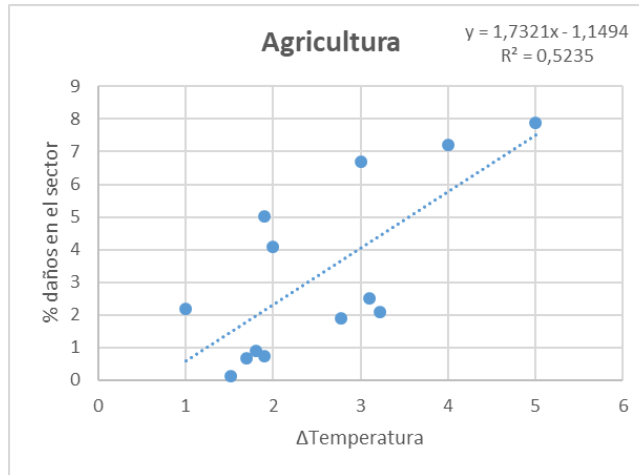
Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Recopilación de estimaciones de daños encontradas en la literatura para el sector del transporte terrestre (en la base de datos WIOD: 23. Transporte terrestre)

Daños a la producción en relación con el nivel de cambio climático	Método de estimación	Región	Referencia	Obtención del % de daños
1,45% cuando variación de temperatura = 1,9°C (absoluto)	ICES (basado en aproximación CGE), con escenario A1B	Mundial	Bosello, F., Eboli, F., & Pierfederici, R. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2004966	Media de los datos de la tabla 4
5% cuando variación de temperatura = 2°C (absoluto)	Revisión literaria	Mundial	M. J. Koetse and P. Rietveld doi:10.1016/j.trd.2008.12.004	Dato obtenido de la revisión literaria
6% cuando variación de temperatura = 3°C (absoluto)	Revisión literaria	Mundial	M. J. Koetse and P. Rietveld doi:10.1016/j.trd.2008.12.004	Dato obtenido de la revisión literaria
2,5% cuando variación de temperatura = 2°C (absoluto)	Revisión literaria	Mundial	M. J. Koetse and P. Rietveld doi:10.1016/j.trd.2008.12.004	Dato obtenido de la revisión literaria
5,87% cuando variación de temperatura = 3,75°C (absoluto)	Mod. RCP4,5, esc. CANESM2	USA	P. Chinowsky et al. doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.05.007	Estimación hecha con datos de tablas 1 y 3
4,75% cuando variación de temperatura = 3,38°C (absoluto)	Mod. RCP4,5, esc. CCSM4	USA	P. Chinowsky et al. doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.05.007	Estimación hecha con datos de tablas 1 y 3
3,51% cuando variación de temperatura = 2,07°C (absoluto)	Mod. RCP4,5, esc. GISS-E2-R	USA	P. Chinowsky et al. doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.05.007	Estimación hecha con datos de tablas 1 y 3
6,25% cuando variación de temperatura = 4,67°C (absoluto)	Mod. RCP4,5, esc. HadGEM2-Es	USA	P. Chinowsky et al. doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.05.007	Estimación hecha con datos de tablas 1 y 3
5,47% cuando variación de temperatura = 3,36°C (absoluto)	Mod. RCP4,5, esc. MIROC5	USA	P. Chinowsky et al. doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.05.007	Estimación hecha con datos de tablas 1 y 3
7,29% cuando variación de temperatura = 5,25°C (absoluto)	Mod. RCP8,5, esc. CANESM2	USA	P. Chinowsky et al. doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.05.007	Estimación hecha con datos de tablas 1 y 3
6,09% cuando variación de temperatura = 4,79°C (absoluto)	Mod. RCP8,5, esc. CCSM4	USA	P. Chinowsky et al. doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.05.007	Estimación hecha con datos de tablas 1 y 3
4,77% cuando variación de temperatura = 3,51°C (absoluto)	Mod. RCP8,5, esc. GISS-E2-R	USA	P. Chinowsky et al. doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.05.007	Estimación hecha con datos de tablas 1 y 3
8,07% cuando variación de temperatura = 7,02°C (absoluto)	Mod. RCP8,5, esc. HadGEM2-ES	USA	P. Chinowsky et al. doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.05.007	Estimación hecha con datos de tablas 1 y 3
6,56% cuando variación de temperatura = 4,57°C (absoluto)	Mod. RCP8,5, esc. MIROC5	USA	P. Chinowsky et al. doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.05.007	Estimación hecha con datos de tablas 1 y 3
2,13% cuando variación de temperatura = 1,51°C (absoluto)	Modelo CGE, escenario SRES A1	Mundial	Berrittella, M. et al https://doi.org/10.1016/j.tourman.2005.05.002	Estimación a partir de los datos de la tabla 5

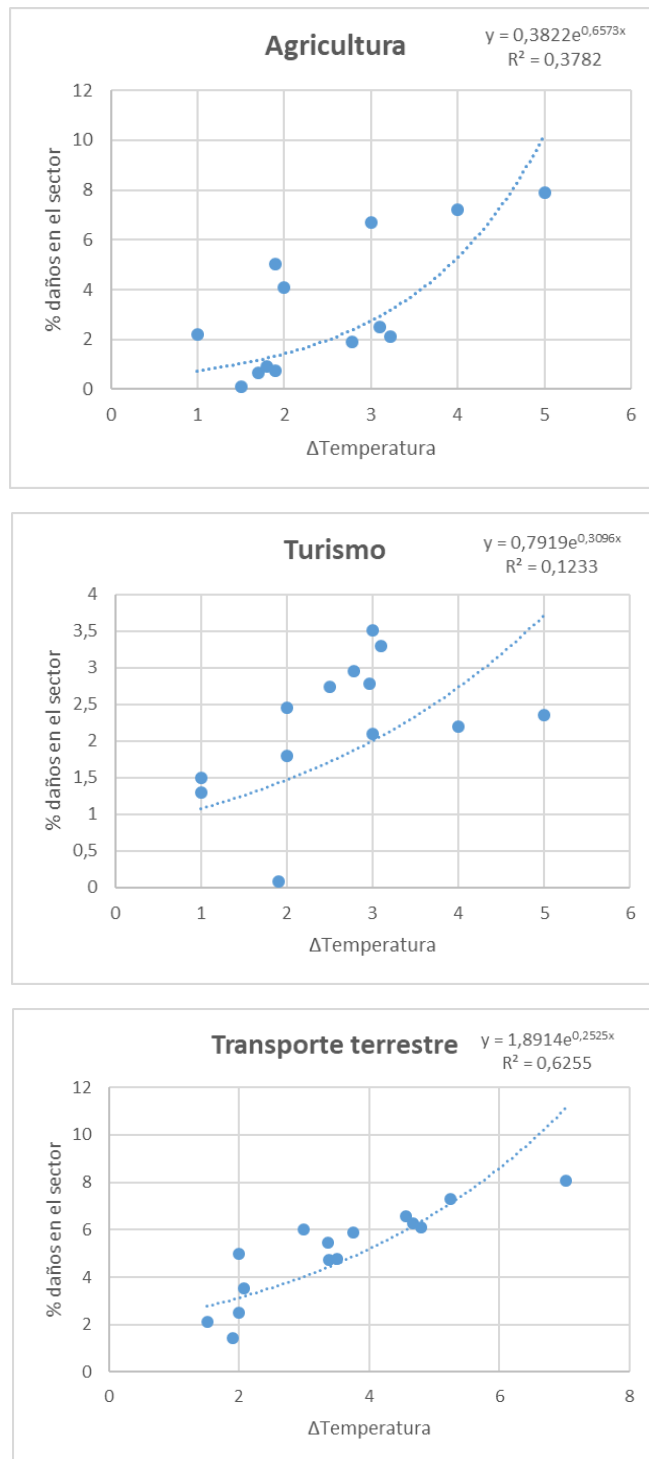
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 32. Regresiones lineales para los tres sectores estudiados



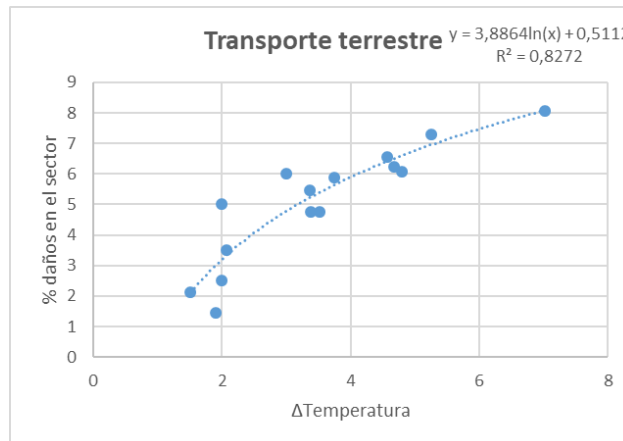
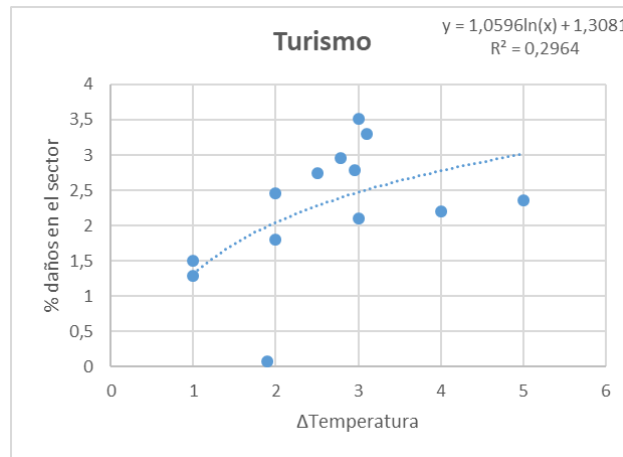
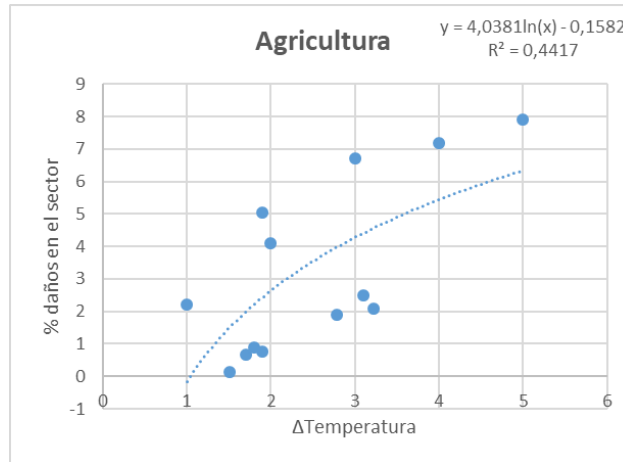
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 33. Regresiones exponenciales para los tres sectores estudiados



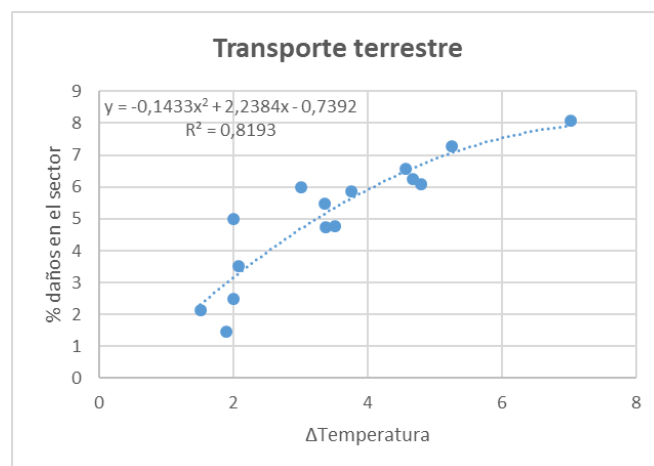
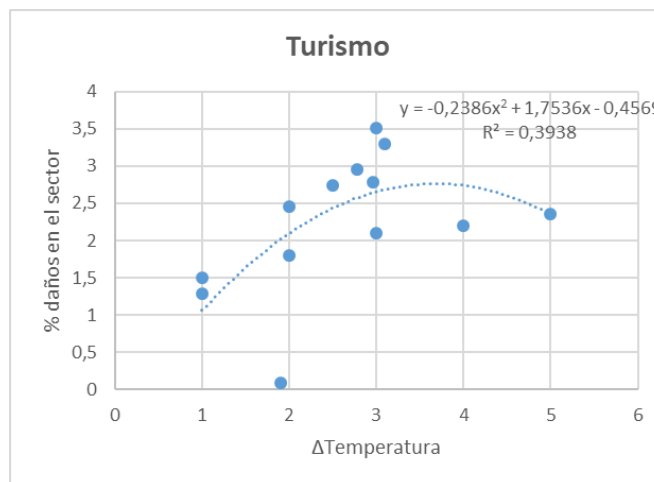
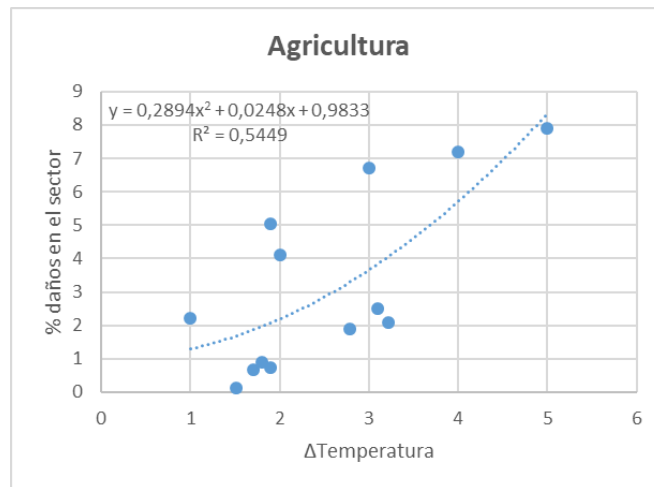
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 34. Regresiones logarítmicas para los tres sectores estudiados



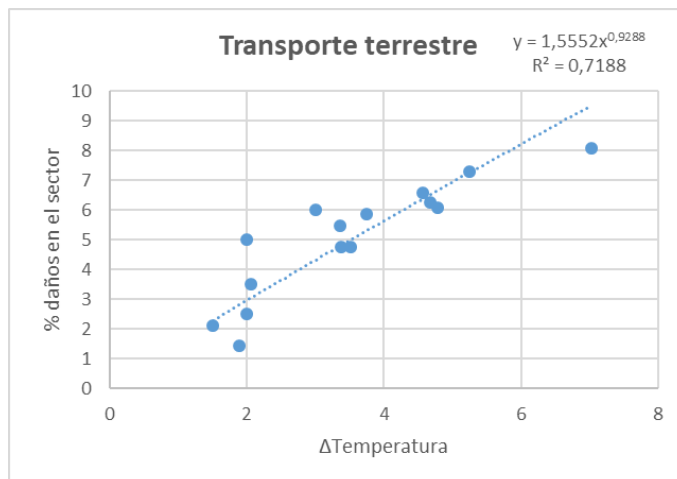
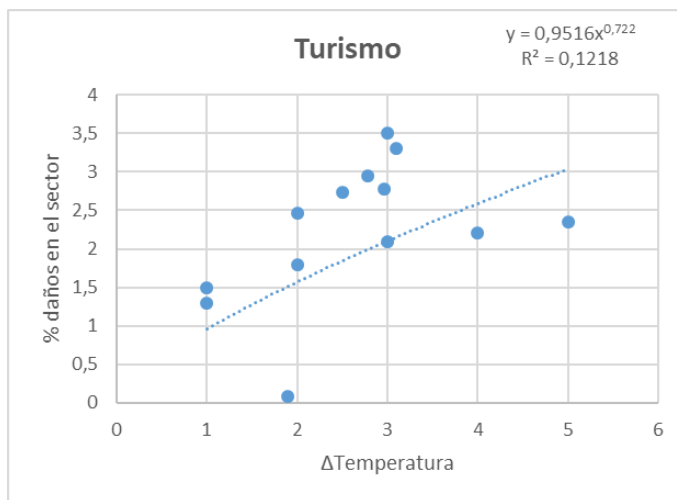
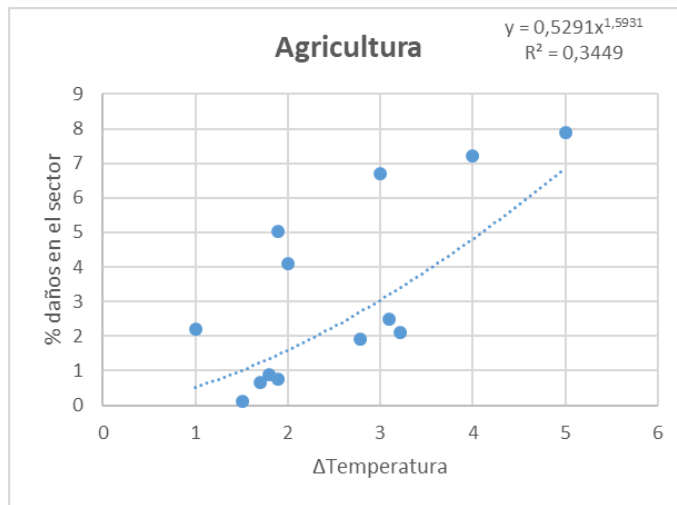
Fuente: *Elaboración propia*

Gráfico 35. Regresiones polinómicas para los tres sectores estudiados



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 36. Regresiones potenciales para los tres sectores estudiados



Fuente: Elaboración propia