



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Escenarios futuros de emisiones de CO₂ en Europa:
validando la identidad de Kaya y el imperativo de la
captura de carbono.

Future CO₂ Emissions Scenarios in Europe:
Validating the Kaya Identity and the Imperative of
Carbon Capture.

Autor/es

Sofía Nieves Calvo

Director/es

Luis Miguel Romeo Giménez

Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética
Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2025

MEMORIA

ÍNDICE

RESUMEN.....	2
ABSTRACT	3
1. Introducción.....	4
1.1. Situación actual y previsiones del cambio climático	4
1.1.1. Impactos y consecuencias del cambio climático	8
1.2. Políticas y objetivos europeos	9
1.2.1. El Pacto Verde Europeo	9
1.2.2. La Ley Europea del Clima	9
1.2.3. El paquete “Fit for 55”	10
1.2.4. Metas establecidas.....	10
1.3. Objetivos	12
2. Validación de la identidad de Kaya	13
2.1. Identidad de Kaya.....	13
2.2. Metodología	15
2.3. Resultados.....	18
3. Planteamiento de escenarios futuros	25
3.1. Tendencia evolutiva de los factores de Kaya	26
3.2. Escenarios	32
3.2.1. Escenarios modificando el factor población (1.a, 1.b y 1.c).....	33
3.2.2. Escenarios modificando el factor PIB per cápita (2.a, 2.b y 2.c).....	34
3.2.3. Escenarios modificando el factor de Intensidad de Energía (3.a, 3.b y 3.c).....	36
3.2.4. Escenarios modificando el factor de Intensidad de Carbono (4.a, 4.b y 4.c).....	38
3.2.5. Escenarios objetivos de la UE (5.a, 5.b, 5.c)	39
3.2.6. Implementación de Captura y Almacenamiento de CO ₂	44
4. Conclusiones	47
5. Bibliografía	49

RESUMEN

Como consecuencia del gran desafío actual que constituye el cambio climático, la Unión Europea estableció una serie de objetivos de reducción de emisiones de CO₂ como parte del Pacto Verde Europeo de 2019, con el propósito final de alcanzar emisiones netas iguales a cero en el año 2050. Para ello, se han desarrollado políticas que impulsan el uso de fuentes de energía renovables, así como la mejora de la eficiencia energética y la descarbonización de sectores como el transporte o la industria.

La identidad de Kaya es una expresión matemática que permite descomponer y analizar estructuralmente las emisiones de CO₂ en cuatro factores clave: la población (factor social), el Producto Interior Bruto (PIB) per cápita (factor económico), la intensidad energética y la intensidad de carbono (factores tecnológicos). La utilidad de esta ecuación como herramienta para predecir las emisiones de CO₂ en escenarios futuros se demuestra mediante el análisis de un muestreo de datos históricos de 19 países europeos. En él, se lleva a cabo la comparación entre las emisiones reales registradas y las calculadas con la fórmula, obteniendo una desviación media aceptable que confirma la aplicabilidad del modelo.

A partir de la extrapolación de las tendencias históricas de cada factor de Kaya, se plantean una serie de escenarios futuros que permiten analizar el impacto tanto de forma individual como combinada de cada uno de los factores sobre el total de emisiones estimadas. De esta manera, se corrobora si es posible cumplir los objetivos europeos de reducción de emisiones fijados para los años 2030, 2040 y 2050 mediante modificaciones razonables de los parámetros de Kaya. Para cada escenario, se diferencia el caso de España individualmente, del muestreo de Europa agregado, y de la segregación en tres grupos de los 19 países en función de su nivel de desarrollo económico.

En líneas generales, se concluye que los factores que mayor impacto muestran sobre el total de emisiones de CO₂ son la intensidad de carbono y el crecimiento económico, mientras que la intensidad energética, especialmente en los países de mayor riqueza, cada vez es un factor más limitante dados los avances ya alcanzados en mejoras de eficiencia energética. Los resultados de emisiones estimados en 2050 indican que, si bien algunos escenarios pueden acercarse a la meta con reducciones ambiciosas en intensidad de carbono y PIB per cápita, en todos los casos será necesario implementar tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ para conseguir la neutralidad climática.

ABSTRACT

As a result of the current major challenge posed by climate change, the European Union established a series of CO₂ emission reduction targets as part of the European Green Deal in 2019, with the ultimate goal of achieving net-zero emissions by 2050. To this end, policies have been developed to promote the use of renewable energy sources, as well as improving energy efficiency and decarbonizing sectors such as transportation and industry.

The Kaya identity is a mathematical expression that allows the decomposition and structural analysis of CO₂ emissions into four key factors: population (social factor), GDP per capita (economic factor), energy intensity, and carbon intensity (technological factors). The usefulness of this equation as a tool to predict future CO₂ emissions scenarios is demonstrated through the analysis of a sample of historical data from 19 European countries. In this analysis, a comparison is made between the actual recorded emissions and those calculated using the formula, resulting in an acceptable mean deviation that confirms the applicability of the model.

Based on the extrapolation of historical trends for each Kaya factor, a series of future scenarios are proposed to analyze the impact, both individually and combined, of each factor on the total estimated emissions. This way, it is verified whether it is possible to meet the European emission reduction targets set for the years 2030, 2040, and 2050 through reasonable modifications of the Kaya parameters. For each scenario, Spain is differentiated from the aggregated European sample, as well as the segregation of the 19 countries into three groups based on their level of economic development.

In general, it is concluded that the factors with the greatest impact on the total CO₂ emissions are carbon intensity and economic growth, while energy intensity, especially in wealthier countries, is becoming an increasingly limiting factor due to the advances already made in energy efficiency improvements. The estimated emissions results for 2050 indicate that, while some scenarios may approach the target with ambitious reductions in carbon intensity and GDP per capita, in all cases, it will be necessary to implement carbon capture and storage technologies to achieve climate neutrality.

1. Introducción

1.1. Situación actual y previsiones del cambio climático

De acuerdo con el último informe publicado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático en marzo de 2023 (IPCC, 2023), conocido como AR6, la temperatura media de la superficie terrestre aumentó 1,1 °C en el periodo de 2011 a 2020 respecto a los niveles de los años previos a la industrialización (1850-1900). Las actividades humanas, principalmente a través de las emisiones de gases de efecto invernadero, han sido la causa inequívoca de este calentamiento global. Estas no han dejado de crecer a través de contribuciones desiguales debido al uso insostenible de la energía y del suelo, además de patrones de consumo y producción insostenibles que varían entre regiones, países e incluso individuales.

Los principales efectos observados como consecuencia del cambio climático constituyen los siguientes (AEMET & OECC, 2021):

- Reducción del área cubierta por hielo marino en el Ártico de un 40 % en septiembre y un 10 % en marzo en la década de 2010-19 respecto al periodo de 1979-88.
- Desplazamiento de las zonas climáticas hacia los polos en ambos hemisferios y prolongación de la temporada de crecimiento vegetal hasta dos días por década desde 1950.
- Subida del nivel medio del mar de 0,20 m entre 1901 y 2018 debido a la expansión térmica del agua (50 %), pérdida de hielo de los glaciares (22 %), pérdida de los mantos de hielo (20 %) y cambios en el almacenamiento de agua terrestre (8 %).
- Incremento de la frecuencia de episodios extremos meteorológicos y climáticos, tales como olas de calor, precipitaciones fuertes, sequías y ciclones tropicales desde la década de 1950.

La curva de Keeling de la Institución Oceanográfica de la Universidad de California San Diego (2024) registra diariamente la concentración de dióxido de carbono (CO₂), principal gas de efecto invernadero, desde 1960. A finales de 2024, la concentración alcanza 424,63 ppm, aunque en los meses de primavera llega a superar los 426 ppm (figura 1).

Desde el comienzo de los registros en 1960, los niveles han aumentado en más de 100 ppm y la tendencia se mantiene creciente (figura 2).

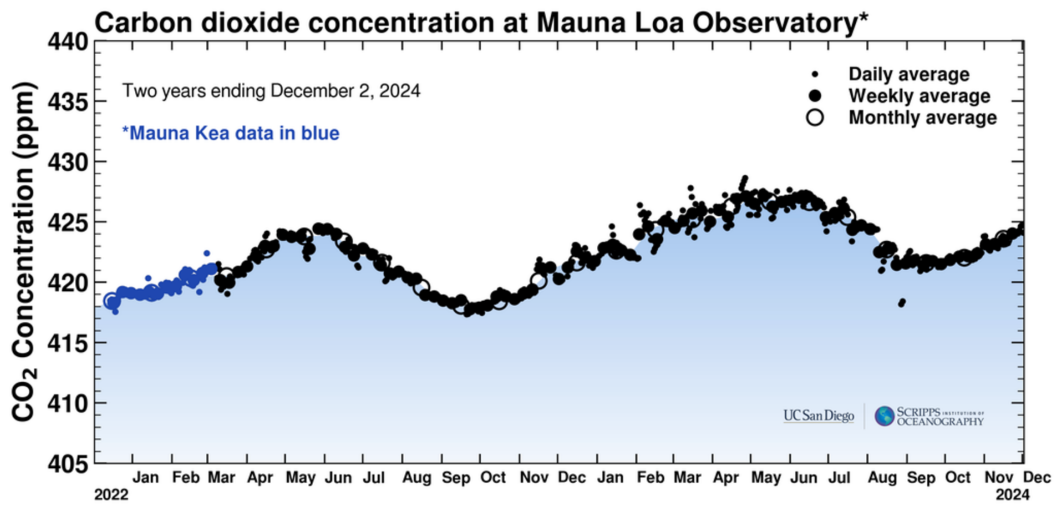


Figura 1. Concentración de CO₂ entre enero de 2022 y diciembre de 2024 (UC San Diego, 2024).

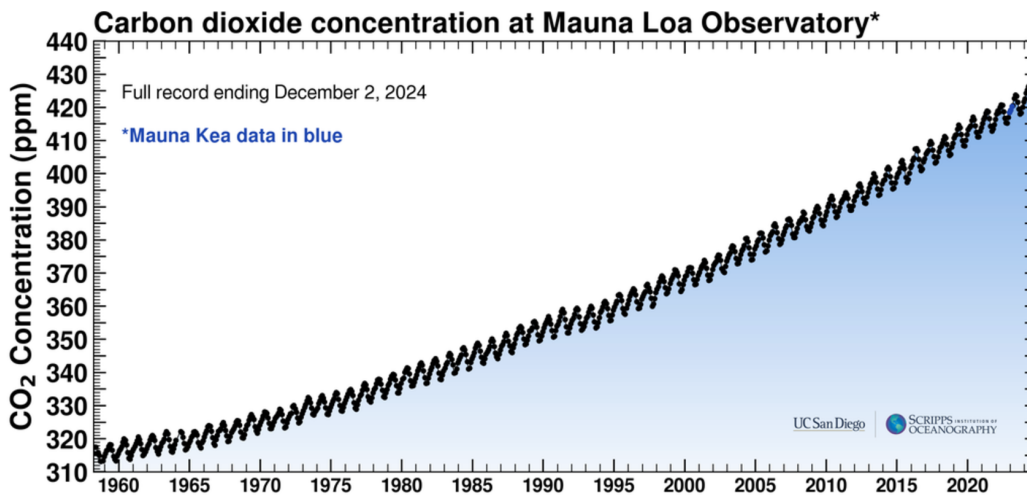


Figura 2. Concentración de CO₂ entre enero de 1960 y diciembre de 2024 (UC San Diego, 2024).

De cara al futuro, el IPCC (2023) propone cinco escenarios climáticos posibles denominados con la nomenclatura SSPx-y, donde “x” hace referencia a la trayectoria socioeconómica compartida e “y” al nivel de forzamiento radiativo alcanzado en el año 2100. Las emisiones de CO₂ varían entre los distintos escenarios en función de los contextos socioeconómicos y las acciones tomadas para mitigar el cambio climático. Los escenarios, simulados hasta el año 2100, que son los siguientes (figura 3):

- SSP1-1.9 (Emisiones muy bajas): escenario de sostenibilidad donde se implementarían políticas climáticas estrictas y a nivel global, logrando no solo alcanzar un balance neto de emisiones igual a cero, sino incluso reducir la concentración de CO₂ mediante tecnologías de absorción y captura. Supondría una reducción de la desigualdad entre países y una mejora en la gestión de recursos comunes, disminuyendo el consumo material y la intensidad energética.
- SSP1-2.6 (Emisiones bajas): escenario con políticas climáticas más moderadas donde también se alcanzaría el balance negativo en emisiones para el año 2100.
- SSP2-4.5 (Emisiones medias): escenario con algunas medidas políticas climáticas, donde se alcanzaría un máximo de emisiones antes de disminuir gradualmente. No se consigue la neutralidad climática pero sí disminuye el nivel respecto a la actualidad. El nivel de desarrollo y crecimiento económico es desigual entre países, y los patrones de consumo no se desvían demasiado de los marcados históricamente.
- SSP3-7.0 (Emisiones altas): escenario donde se duplicarían las emisiones en el año 2100. Se asocia a una situación de rivalidad regional, como consecuencia del resurgimiento de conflictos y movimientos nacionalistas, lo que desvía los objetivos políticos de los países hacia la seguridad y competitividad. El crecimiento económico se ralentiza, mientras aumentan las desigualdades y el consumo intensivo de recursos. Algunas regiones podrían experimentar una fuerte degradación ambiental.
- SSP5-8.5 (Emisiones muy altas): escenario basado en el uso de combustibles fósiles donde existe muy bajo compromiso con la reducción de emisiones. Se prioriza el crecimiento económico acelerado y la adopción de sistemas de consumo intensivos a nivel global. Los mercados globales se integran, y se alcanzan grandes progresos tecnológicos e innovadores, lo que lleva a implementar sistemas masivos para descontaminar el aire. Las emisiones de CO₂ aumentan más del triple, hasta que se consiguen estabilizar gracias a las tecnologías desarrolladas.

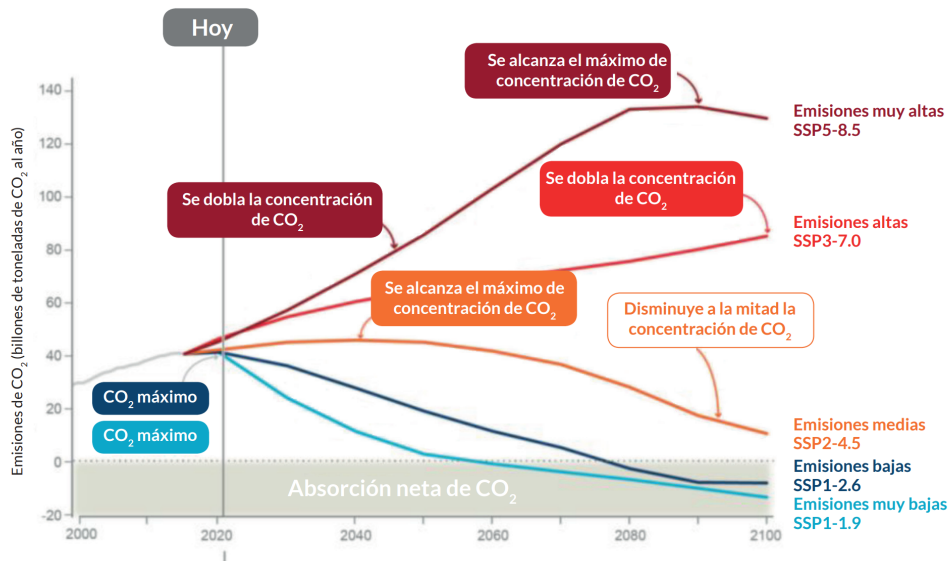


Figura 3. Escenarios SSP de emisiones de CO₂ entre los años 2000 y 2100 (AEMET & OECC, 2021).

La repercusión de los cinco escenarios propuestos sobre el incremento de la temperatura media del planeta se muestra en la figura 4. Para los dos casos más optimistas, SPP1-1.9 y SPP1-2.6, la temperatura aumentaría entre 1 y 2 °C, mientras que se alcanzaría un incremento en casi 5 °C en el escenario SPP5-8.5. Siguiendo la tendencia actual, cabría esperar un aumento de 2,5 a 3 °C.

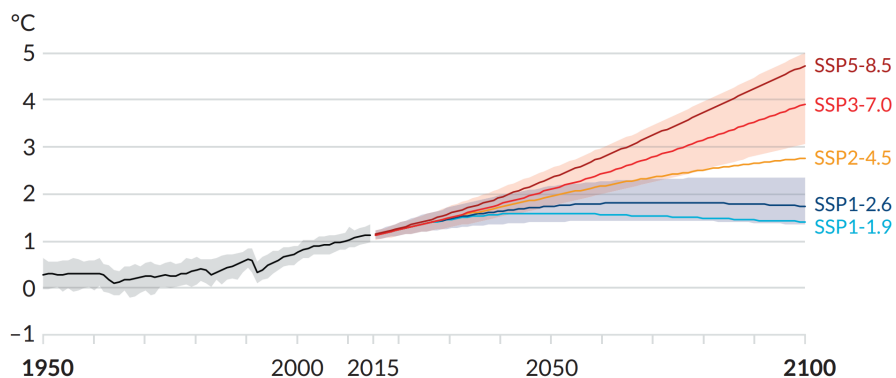


Figura 4. Escenarios SSP de emisiones de CO₂ entre los años 2000 y 2100 (AEMET & OECC, 2021).

Los escenarios SSP resultan de interés en el presente Trabajo Fin de Máster para relacionar las emisiones estimadas de CO₂ mediante la identidad de Kaya con los posibles contextos sociales y económicos en los que se producen, así como los factores que pueden llevar a cada nivel de emisiones en el futuro.

1.1.1. Impactos y consecuencias del cambio climático

Tal y como se refleja en el informe AR6 del IPCC (OECC, 2023), los efectos del cambio climático en los ecosistemas y las sociedades humanas ya son evidentes y se intensificarán en el futuro a medida que aumente el calentamiento global, haciendo urgente actuar para afrontar los riesgos climáticos a través de medidas de adaptación. Los riesgos climáticos a los que se enfrentará el planeta están directamente relacionados con el alcance de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero debido a la estrecha interconexión entre los ecosistemas, el clima y la sociedad.

Tanto la sociedad humana como los ecosistemas poseen un límite de adaptación y mitigación frente a los impactos climáticos, el cual ya se ha alcanzado en algunos casos provocando daños en irreversibles. Entre los impactos más visibles en los ecosistemas se encuentran los cambios en la distribución de especies, en la estructura de los hábitats y en los ciclos de vida estacionales. Por otro lado, en los sistemas humanos, el cambio climático agrava la inseguridad alimentaria por la escasez de agua, la pérdida de productividad agrícola y ganadera, y la disminución de los rendimientos pesqueros. Además, también repercute sobre la salud y bienestar física y mental, aumentando el riesgo de contraer enfermedades infecciosas, de padecer los efectos del calor extremo, y de forzar desplazamientos de población. Finalmente, los impactos climáticos también se ven reflejados en las ciudades y asentamientos urbanos a través de inundaciones interiores y costeras por tormentas, daños en infraestructuras y pérdidas económicas relevantes.

A corto plazo, si se alcanza un aumento de 1,5 °C en torno al año 2040, se desencadenarán múltiples peligros climáticos cuyo impacto dependerá de la vulnerabilidad, exposición y capacidad de adaptación de cada región. A medio y largo plazo, los daños aumentarán proporcionalmente con la temperatura, y por encima de los 3 °C, los riesgos serán extremadamente altos para todos los sistemas evaluados.

En cuanto al futuro de Europa ante el calentamiento global, cabe esperar un desplazamiento de las zonas climáticas donde el clima desértico y semiárido se extenderá por la región mediterránea. Concretamente, en la Península Ibérica se espera que el clima mediterráneo se expanda hacia el norte, ocupando la cornisa cantábrica, mientras que el desértico ocuparía la mitad oriental. De igual manera, el clima oceánico templado y continental de Europa central se vería desplazado por climas más cálidos y secos (IPCC, 2023).

1.2. Políticas y objetivos europeos

El cambio climático es uno de los desafíos más urgentes de la actualidad, lo que ha llevado a la implementación de diversas políticas destinadas a mitigar sus efectos negativos. La reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, la mejora de la eficiencia energética y el aumento de la proporción de energía renovable en el consumo total constituyen prioridades clave en el marco político de la Unión Europea (UE) (Wawrzyniak, 2020). Precisamente, tal y como indican Bigerna & Polinori (2022), la UE se ha convertido en líder mundial en la lucha contra el cambio climático desde la década de 2010, impulsando iniciativas ambiciosas como la Agenda 2030, el Pacto Verde Europeo, el plan de Recuperación Next Generation EU, y, finalmente, la Descarbonización en 2050.

1.2.1. El Pacto Verde Europeo

La Comisión Europea firmó en 2019 el Pacto Verde Europeo (Comisión Europea, 2019), estrategia destinada a transformar la Unión Europea (UE) en una sociedad igualitaria y próspera manteniendo una economía competitiva a la par que eficiente en el uso de recursos. Pretende alcanzar cero emisiones netas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) para 2050, desvinculando el crecimiento económico del consumo de recursos naturales.

El Pacto Verde también busca preservar y mejorar el capital natural de la UE, al mismo tiempo que protege la salud y el bienestar de los ciudadanos frente a los riesgos ambientales. Además, enfatiza que esta transición debe ser justa e inclusiva, priorizando a las personas y prestando especial atención a las regiones, sectores y trabajadores más afectados por la transición.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas y la Agenda 2030 se encuentran integrados en esta estrategia, situando la sostenibilidad y bienestar en el punto de mira de la elaboración de políticas y planes de acción en la UE. Algunos ejemplos derivados son la Ley Europea del Clima y el paquete legislativo “Fit for 55”.

1.2.2. La Ley Europea del Clima

La Ley Europea del Clima, Reglamento (UE) 2021/1119 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de junio de 2021, establece el objetivo legal de alcanzar la neutralidad climática en 2050 en la Unión Europea y define un marco para que los estados miembros implementen estrategias y planes de adaptación al cambio climático. Además, incluye la

meta intermedia de reducir las emisiones netas de GEI al menos un 55 % para 2030 respecto a 1990, con un límite máximo de 225 millones de toneladas de CO₂ equivalentes a la contribución de las absorciones de CO₂.

La Comisión Europea evaluará cada cinco años el progreso hacia estos objetivos y la coherencia de las políticas nacionales y europeas, con la posibilidad de ajustar medidas según sea necesario. Además, en la ley se crea un Consejo Científico Consultivo que ofrecerá asesoramiento sobre las acciones climáticas y su alineación con los compromisos internacionales, como el Acuerdo de París de 2015.

Este marco legal refuerza el liderazgo de la UE en la lucha contra el cambio climático y garantiza una transición climática basada en la ciencia y en metas claras (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2024).

1.2.3. El paquete “Fit for 55”

El paquete “Fit for 55” u “Objetivo 55” de 2021 (Consejo Europeo, 2024) comprende un conjunto de propuestas legislativas encaminadas a adaptar y revisar la legislación de la UE en materia de energía y clima, siempre con el fin de alcanzar esa reducción de emisiones establecida en 55 % en 2030 por la Ley Europea del Clima. El objetivo del paquete es proporcionar un marco equilibrado y coherente para cumplir las metas de la UE, garantizando una transición igualitaria y socialmente justa, mientras fomenta la innovación de la industria europea.

Las propuestas incluyen medidas específicas en áreas clave, como la ampliación del comercio de derechos de emisión, el impulso a las energías renovables, la mejora de la eficiencia energética y la descarbonización de sectores como el transporte, la industria y los edificios. Algunas de ellas ya se han implementado en la actualidad, mientras que otras se encuentran en negociación.

1.2.4. Metas establecidas

A lo largo del desarrollo del Pacto Verde, la Ley del Clima Europeo y el paquete “Fit for 55” se establecen metas claras y cuantificables relativas a emisiones de GEI, eficiencia energética y energías renovables, entre otras, que se tendrán en cuenta en el presente trabajo en el análisis de posibles escenarios futuros. Las últimas actualizaciones, basadas en el paquete “Fit for 55”, incluyen los siguientes objetivos para 2030 y 2050 (Comisión Europea, 2024).

1. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero:
 - a. Neutralidad climática para el año 2050: la Unión Europea no generará más emisiones atmosféricas de las que puede absorber, siendo el total emisiones netas igual a 0, utilizando si es necesario tecnologías de captura de dióxido de carbono a gran escala.
 - b. Reducción de emisiones para el año 2030 y 2040: la UE ha establecido que las emisiones de GEI deben reducirse un 55 % como mínimo en 2030 y un 90 % en 2040 respecto a los niveles de 1990.
 - c. Reducción de emisiones por sectores: los sectores más intensivos en uso de energía (industria cementera, siderúrgica, cerámica, papelera etc.), regulados de forma conjunta en la UE bajo el Sistema Europeo de Comercio de Emisión (EU ETS), deben reducir sus emisiones en un 62 % para 2030 respecto a 2005. El resto de los sectores (edificación, transporte, agricultura y ganadería, industria no ETS) tendrán que disminuirlas en un 40 % para 2030 respecto a 2005.
 - d. Absorción de CO₂: los sectores del uso de la tierra y silvicultura deben incrementar la absorción de GEI hasta al menos 310 millones de toneladas equivalentes de CO₂.
2. Uso de energías renovables: el porcentaje de fuentes de energías renovables en el consumo energético final, tal y como recoge la Directiva (UE) de Energías Renovables 2023/2413 de 2023, debe alcanzar como mínimo un 42,5 % del mix energético en 2030, idealmente el 45 %. En términos de intensidad de carbono, equivale a una disminución de un 26 % entre 2020 y 2030. Previamente, para el año 2020 se había establecido un objetivo del 20 % y se logró alcanzar un 22,1 %.
3. Eficiencia energética: de acuerdo con la Directiva (UE) 2023/1791 de Eficiencia Energética publicada en 2023, el consumo energético final en la UE debe reducirse en un 11,7 % en 2030 en comparación con las predicciones iniciales realizadas en 2020. Esto equivale a una media de ahorro energético anual de 1,49 % por cada país entre 2024 y 2030, cuando entre 2021 y 2023 era de un 0,8 %. Las medidas de eficiencia energética se enfocan en la renovación de los edificios hacia más eficientes, aplicación de normas de etiquetado energético y ecodiseño, promoción de sistemas de cogeneración, uso de bombas de calor en climatización etc.

1.3. Objetivos

Los objetivos del presente trabajo fin de máster son los siguientes:

- Verificación del cumplimiento de la expresión matemática de la identidad de Kaya para estimar las emisiones de CO₂ a partir de datos reales de fuentes confiables. De esta manera, se demuestra su validez como herramienta para el desarrollo de posibles escenarios predictivos.
- Planteamiento de escenarios futuros de emisiones de CO₂ en España y Europa utilizando los objetivos climáticos europeos de 2030, 2040 y 2050 como referencia. En primer lugar, se analizará por separado la influencia de la variación de los factores de la identidad de Kaya sobre las emisiones de CO₂. Posteriormente, se relacionarán los factores entre sí mediante la ecuación de Kaya buscando sus posibilidades de mejora de cara a alcanzar los escenarios más sostenibles.
- Análisis de la necesidad de incorporar tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ para alcanzar la neutralidad climática partiendo de los escenarios previamente planteados.

2. Validación de la identidad de Kaya

2.1. Identidad de Kaya

De acuerdo con Štreimikienė & Balezentis (2016), la identidad de Kaya es una fórmula matemática que relaciona las emisiones de CO₂ anuales de un país o región con el nivel de consumo energético, el grado de uso de energía renovable, el crecimiento económico y el incremento poblacional. En términos generales, esta herramienta permite analizar la influencia de los factores económicos, demográficos y energéticos sobre las emisiones de dióxido de carbono.

Este modelo de descomposición de las emisiones de CO₂, tal y como describen Xu et al. (2014), fue propuesto por el japonés Yoichi Kaya y se muestra en la ecuación 1, donde el término “Energía” hace referencia al total de energía primaria anual consumida, “PIB” al Producto Interior Bruto, “Población” al número de habitantes y “Emisiones CO₂” al total de emisiones anuales de dióxido de carbono.

$$Emisiones\ CO_2 = Población * \frac{PIB}{Población} * \frac{Energía}{PIB} * \frac{Emisiones\ CO_2}{Energía}$$

Ecuación 1.

Bigerna & Polinori (2022) explican que los cocientes que influyen sobre el total de emisiones de CO₂ pueden simplificarse como:

- PIB per cápita: equivale al Producto Interior Bruto dividido por la población del país o región (PIB/Población). Constituye un indicador económico relacionado con la riqueza y prosperidad, y cabe esperar que un crecimiento económico positivo contribuya a aumentar las emisiones del país.
- Intensidad Energética (IE): es el consumo de energía primaria dividido por el Producto Interior Bruto (Energía/PIB). Dicho de otra forma, es la inversa de la productividad energética. Una reducción en esta intensidad refleja una mayor eficiencia tecnológica en el uso de la energía necesaria para llevar a cabo la actividad económica.
- Intensidad de Carbono (IC): son las emisiones de CO₂ divididas por la energía consumida (Emisiones CO₂/Energía). Equivale a la proporción de emisiones atribuibles a combustibles fósiles y procesos industriales, sirviendo como indicador de eficiencia en carbono. El uso de energías renovables, la economía

circular del carbono y las tecnologías de captura y almacenamiento de carbono contribuyen a reducir directamente las emisiones dentro de un sistema económico fijo.

La ecuación 2 muestra la fórmula de Kaya simplificada de la que se partirá en el apartado de validación de Kaya.

$$Emisiones CO_2 = Población * \frac{PIB}{Población} * IE * IC$$

Ecuación 2.

En el contexto europeo, la identidad de Kaya es especialmente útil para entender la interrelación entre las metas europeas de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, y los objetivos específicos para alcanzarlo, como son el incremento de la eficiencia energética y el uso de energías renovables. La descomposición de las emisiones de CO₂ en factores posibilita, por un lado, analizar cómo se pueden modificar los niveles, así como la potencialidad de cada factor de Kaya por separado para controlar y mitigar el cambio climático (Bigerna & Polinori, 2022).

El IDA (Índice de Descomposición Aditiva) es la metodología aplicada directamente sobre la identidad de Kaya para analizar la contribución de cada uno de los factores de Kaya sobre la variación total de emisiones durante un periodo de tiempo. Tradicionalmente, el IDA se ha utilizado para llevar a cabo estudios retrospectivos de las emisiones de CO₂. No obstante, desde el año 2010 esta metodología se emplea también para realizar análisis de escenarios futuros de emisiones de CO₂ a escala municipal, nacional y multinacional; ganando gran importancia entre los estudios climáticos, incluyendo los recogidos por el IPCC. Las principales aplicaciones del IDA en relación con la identidad de Kaya son: la aplicación de los efectos de cada factor del análisis retrospectivo para ensayar predicciones futuras, y la comparación de escenarios de años futuros descomponiendo las diferencias entre el escenario tendencial presente frente al evaluado (Ang, 2015).

En el presente Trabajo Fin de Máster se utiliza la lógica de la metodología IDA sobre la estructura de la identidad de Kaya para explorar escenarios prospectivos en base a las tendencias históricas de cada factor por separado. Se evaluará el efecto aislado y combinado de cada componente sobre las emisiones totales estimadas, lo que permitirá identificar qué factores deben modificarse y en qué magnitud para alcanzar los objetivos climáticos de la Unión Europea.

Los datos originales empleados para el cálculo en la validación, con sus respectivas unidades de medida, son los siguientes (disponibles en tablas 1- 5 del Anexo):

- Población anual (nº habitantes) (Banco Mundial de Datos, 2024).
- Producto Interior Bruto (PIB) anual per cápita en dólares estadounidenses con el valor de 2015 (EEUU\$ 2015/habitante) (Banco Mundial de Datos, 2024).
- Intensidad de energía en Megajulios por PIB en dólares estadounidenses con el valor del año 2017 (MJ/EEUU\$ 2017) (Banco Mundial de Datos, 2024).
- Emisiones de CO₂ por PIB en dólares estadounidenses con el valor del año 2015 (kg CO₂/EEUU\$ 2015) (Banco Mundial de Datos, 2024).
- Emisiones de CO₂ (t) atribuidas a combustibles fósiles y procesos industriales (Our World in Data, 2024).

Para realizar la comprobación directa de la identidad de Kaya, se va a utilizar la fórmula simplificada de Kaya (ecuación 2) previamente explicada, donde las emisiones de CO₂ se calculan como el producto de la población, el PIB per cápita (PIB/Población), la Intensidad Energética y la Intensidad de Carbono. Previamente, se deben transformar las unidades de cada factor simplificado a las indicadas en la tabla 1 para unificarlas y obtener las emisiones de CO₂ de la fórmula en toneladas (t).

Tabla 1. Unidades de medida finales de cada factor de Kaya simplificado para la validación de la Identidad de Kaya (elaboración propia).

Factor de Kaya simplificado	Unidad de medida
Población	Nº habitantes
PIB per cápita	EEUU\$ 2015/habitante
Intensidad Energética (IE)	MJ/EEUU\$ 2015
Intensidad de Carbono (IC)	t CO ₂ /MJ

Tal y como se muestra en la tabla 1, las unidades monetarias que se van a utilizar son los dólares estadounidenses ajustados al valor de 2015 como año de referencia, evitando así el efecto de la inflación al comparar entre diferentes años y países. De esta manera, se van a transformar los datos de Intensidad Energética empleando el deflactor del PIB de Estados Unidos del año 2017 dividido por el deflactor del PIB de 2015 (Banco Mundial de Datos, 2024), tal y como muestra la ecuación 3:

- Deflactor del PIB de EEUU en 2015 = 100
- Deflactor del PIB de EEUU en 2017 = 102,758144

$$\text{Intensidad de Energía} \left(\frac{MJ}{\text{EEUU\$ 2015}} \right) = \text{Intensidad de Energía} \left(\frac{MJ}{\text{EEUU\$ 2017}} \right) * \frac{\text{Deflactor PIB 2017}}{\text{Deflactor PIB 2015}}$$

Ecuación 3.

En segunda instancia, es necesario obtener los datos de Intensidad de Carbono expresados en toneladas por Megajulio, mediante la transformación de las emisiones de CO₂ por dólares de PIB. Para ello, se aplica la ecuación 4, que utiliza la ya conocida Intensidad de Energía para eliminar el término monetario.

$$\text{Intensidad de Carbono} \left(\frac{t \text{ CO}_2}{MJ} \right) = \frac{\text{Emisiones de CO}_2 (kg)}{\text{PIB}(\text{EEUU\$ 2015})} * \frac{1}{\text{Intensidad de Energía} \left(\frac{MJ}{\text{EEUU\$ 2015}} \right)} * \frac{1 t}{1000 kg}$$

Ecuación 4.

Una vez transformadas todas las unidades, ya se puede proceder a la aplicación de la fórmula de Kaya simplificada para su validación. Para ello, se va a considerar un margen de incertidumbre razonable sobre cada uno de los cuatro parámetros de la identidad de Kaya en función de la precisión de los datos reportados por los organismos internacionales. Para la población, según el Banco Mundial de Datos (2024), la incertidumbre es muy reducida gracias al control de los censos, siendo de ±0,5 %; mientras que para el PIB per cápita suele ser ligeramente superior, en torno a ±3 %. En cuanto a la intensidad energética, el valor de la incertidumbre alcanza ±4 % debido al margen de error en los reportes del consumo energético de cada país. Finalmente, la mayor incertidumbre proviene de la intensidad de carbono, donde la estimación de las emisiones introduce un error de entre el ±5-10% en función del país. Los valores que se van a considerar en esta metodología son los siguientes:

- Población: ±0,5 %
- PIB per cápita: ±3 %
- Intensidad de energía (IE): ±4 %
- Intensidad de carbono (IC): ±8 %

En la identidad de Kaya, al tratarse de un producto de cuatro factores, el error relativo máximo se propaga de acuerdo con la ecuación 5, donde (σ^i/i) representa la incertidumbre relativa de cada factor de la fórmula (Bevington & Robinson, 2003).

$$\frac{\sigma_x^2}{X^2} = \frac{\sigma_u^2}{U^2} + \frac{\sigma_v^2}{V^2} + \frac{\sigma_y^2}{Y^2} + \frac{\sigma_z^2}{Z^2}$$

Ecuación 5.

Aplicando los valores de incertidumbre previamente establecidos, y despejando la ecuación X, se obtiene el siguiente resultado:

$$\frac{\sigma_x}{X} = \sqrt{0,5^2 + 3^2 + 4^2 + 8^2} = \pm 9,45 \%$$

Finalmente, se concluye que el valor esperado de incertidumbre del resultado de las emisiones de CO₂ calculadas mediante la identidad de Kaya es de ± 9,45 %. Por lo tanto, la desviación entre los datos anuales de emisiones registradas y las calculadas no debería superar ese valor para verificar el cumplimiento de la ecuación. El análisis de las desviaciones se incluye para cada país seleccionado de forma individual y sobre el total de emisiones de los 19 países europeos, calculado siguiendo la ecuación 6.

$$\text{Desviación (\%)} = \frac{(\text{Emisiones CO}_2 \text{ calculadas (t)} - \text{Emisiones CO}_2 \text{ registradas (t)})}{\text{Emisiones CO}_2 \text{ calculadas (t)}} * 100$$

Ecuación 6.

2.3. Resultados

A continuación, se exponen los resultados y conclusiones de los cálculos de validación de la identidad de Kaya para los 19 países seleccionados. De forma preliminar, el análisis completo de la desviación de las emisiones de CO₂ registradas frente a las calculadas mediante Kaya se ha repetido con los datos de cinco años distintos (2000, 2005, 2010, 2015 y 2020). Posteriormente, para los países con resultados más llamativos se ha representado la tendencia completa entre los años 2000 y 2020 de ambos grupos de datos de emisiones, junto con el área de desviación máxima admisible. Las tablas 2 y 3 contienen los datos resultantes de los años 2010 y 2020, mientras que los años restantes se incluyen en el anexo (tablas 6 – 8).

En primera instancia, se puede afirmar que la desviación a nivel total de los países analizados es inferior al valor máximo admisible establecido en 9,45 % para todos los años (figura 6), siendo los dos primeros años (2000 y 2005) los que más difieren y 2020 el que menor incertidumbre muestra. Por lo tanto, la tendencia de la brecha entre emisiones calculadas mediante Kaya y registradas es descendiente con el tiempo, lo que sugiere que los factores de la identidad de Kaya han mejorado en su precisión para determinar las

emisiones de CO₂. Esto puede deberse a que los datos recopilados, especialmente la intensidad energética e intensidad de carbono, han reducido su margen de error con los años como consecuencia de los avances tecnológicos experimentados y del incremento de la implicación europea en controlar las emisiones.

Comparación del total de emisiones de CO₂ (2000-2020): Registradas vs Calculadas

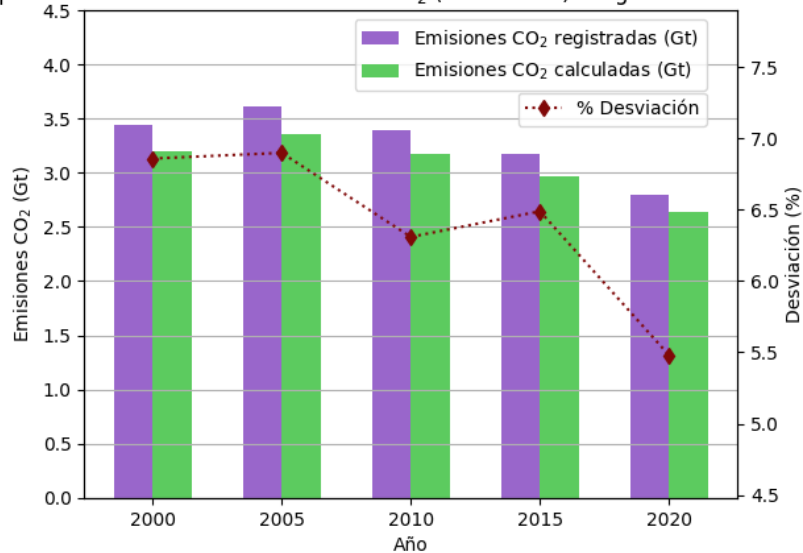


Figura 6. Comparación de la evolución temporal del total de emisiones de CO₂ calculadas mediante la identidad de Kaya frente a las registradas y su porcentaje de desviación (Elaboración propia).

A continuación, la figura 7 incluye cuatro gráficas de evolución temporal de las emisiones de CO₂ calculadas y registradas para los países de Suiza, Noruega, Lituania y España. En ellas, se representa el área de incertidumbre máxima establecido previamente en 9,45 %. Se pueden observar diferencias relevantes entre la capacidad de la identidad de Kaya de predecir las emisiones de CO₂ en estos países:

- Suiza (I) y España (IV): las emisiones calculadas y registradas entre los años 2000 y 2020 son muy similares, mostrando rangos de desviación pequeños (≤ 5 %) y siempre dentro de los valores de margen de error contemplados. Por ello, se puede afirmar que la predictibilidad de la identidad de Kaya en estos países es más alta que en la media de la muestra analizada.
- Noruega (II): muestra los resultados con mayor discrepancia entre las emisiones calculadas respecto a las registradas, siendo estas últimas más elevadas, lo que sugiere que el modelo de Kaya subestima las emisiones posiblemente debido a factores específicos del país que no se contemplan en la fórmula. En Noruega, la

extracción y refinado de gas natural y petróleo podría estar incrementando el valor de las emisiones contabilizadas ya que, aunque la mayor parte se exporta, el proceso de obtención y tratamiento de estos combustibles fósiles se contabiliza como emisiones propias. Se estima que constituyen en torno al 25 % de las emisiones del país, lo que justifica los elevados valores de desviación, especialmente entre 2000 y 2008 (Gavenas et al., 2015). Además, la principal fuente de energía que utilizan localmente es la hidráulica, reduciendo así los factores de intensidad energética e intensidad de carbono de la ecuación de Kaya. No obstante, la tendencia de los datos representados es más similar y aproximada a partir de 2008 ya que el gobierno noruego ha aplicado políticas ambientales para reducir las emisiones de la industria petrolífera y del gas natural. Cabe esperar que, conforme se reducen las emisiones del sector, la desviación entre emisiones de CO₂ estimadas mediante Kaya y registradas siga disminuyendo y la ecuación gane precisión.

- Lituania (III): se observa una tendencia similar a la de Noruega, donde las emisiones registradas son consistentemente más altas que las calculadas, aunque no tan acentuada. En este caso, la diferencia puede atribuirse a los cambios en la estructura económica y en las fuentes de energía utilizadas en el país, donde cerró una importante central nuclear y aumentó la dependencia del gas natural y biomasa. En concreto, según el protocolo de Gases de Efecto Invernadero (WRI & WBCSD, 2015), las emisiones generadas en la quema de biomasa y biocombustibles no se contabilizan dentro de las emisiones del sector energético, por lo que no influyen en el factor de Kaya de intensidad de carbono. Sin embargo, en el cómputo global de emisiones de CO₂ del país podrían estar incluyendo las derivadas del ciclo de vida de la biomasa e influir en la subestimación de la ecuación de Kaya. No obstante, al igual que en el caso de Noruega, la forma de la tendencia de los datos estimados y registrados es similar.

El análisis de la validación de la identidad de Kaya demuestra que resulta una herramienta válida y útil para estimar las emisiones de CO₂ y proyectar escenarios futuros, evaluando el impacto de las políticas climáticas aplicadas en Europa. La mejora en la precisión de los datos con el tiempo, junto con el desarrollo tecnológico y las políticas ambientales implementadas, ha reducido progresivamente la brecha entre las emisiones calculadas y registradas. Aunque casos como los de Noruega y Lituania evidencian la

necesidad de considerar particularidades en la fórmula, como las emisiones derivadas de la extracción de combustibles fósiles y el tratamiento contable de la biomasa, la identidad de Kaya sigue siendo una aproximación útil para evaluar las tendencias de emisiones a gran escala. Su capacidad predictiva mejora conforme se dispone de datos más precisos y representativos del contexto energético y económico de cada país, reforzando su valor como herramienta analítica en el estudio de las emisiones de CO₂.

Tabla 2. Resultados de los cálculos de la desviación de las emisiones de CO₂ obtenidas mediante la identidad de Kaya frente a los datos registrados para 19 países europeos con datos tomados del año 2010 (Elaboración propia).

	Emisiones CO ₂ (t) registradas	Emisiones CO ₂ (t) calculadas	Desviación	Población	PIB/población (US\$/cápita)	Intensidad de Energía (MJ/US\$)	Intensidad de Carbono (t/MJ)
Austria	72.017.330	69.965.100	2,85%	8.363.404	43.334,51	3,35	5,76E-05
Bulgaria	47.808.404	44.740.600	6,42%	7.395.599	6.434,55	5,65	1,66E-04
Suiza	45.043.332	45.207.800	-0,37%	7.824.909	81.315,42	2,18	3,26E-05
Alemania	831.129.600	773.069.100	6,99%	81.776.930	37.760,91	3,67	6,82E-05
España	282.937.100	274.140.600	3,11%	46.576.897	25.702,35	3,16	7,26E-05
Finlandia	64.081.000	62.526.400	2,43%	5.363.352	43.563,57	6,39	4,19E-05
Francia	376.563.900	347.940.100	7,60%	65.030.575	35.638,12	4,11	3,65E-05
Grecia	97.354.150	87.578.500	10,04%	11.121.341	21.560,35	3,19	1,15E-04
Croacia	21.018.168	19.457.300	7,43%	4.295.427	11.937,10	3,82	9,92E-05
Hungría	52.087.460	47.880.500	8,08%	10.000.023	11.307,72	4,61	9,19E-05
Irlanda	41.793.224	40.347.700	3,46%	4.560.155	46.246,85	2,53	7,57E-05
Italia	436.534.300	405.272.300	7,16%	59.277.417	32.058,17	2,94	7,25E-05
Lituania	13.803.169	12.603.000	8,69%	3.097.282	11.106,95	4,08	8,98E-05
Países Bajos	182.358.960	171.110.500	6,17%	16.615.394	44.390,50	4,10	5,66E-05
Noruega	45.621.000	40.116.400	12,07%	4.889.252	72.804,40	4,58	2,46E-05
Polonia	334.224.580	313.739.100	6,13%	38.042.794	10.755,66	4,78	1,60E-04
Rumanía	86.094.090	77.601.900	9,86%	20.246.871	7.657,54	3,62	1,38E-04
Serbia	45.696.428	47.103.900	-3,08%	7.291.436	5.206,09	6,36	1,95E-04
Turquía	316.193.060	297.814.000	5,81%	73.142.150	8.396,92	3,11	1,56E-04
TOTAL	3.392.359.255	3.178.214.800	6,31%				

Tabla 3. Resultados de los cálculos de la desviación de las emisiones de CO₂ obtenidas mediante la identidad de Kaya frente a los datos registrados para 19 países europeos con datos tomados del año 2020 (Elaboración propia).

Países	Emisiones CO ₂ (t) registradas	Emisiones CO ₂ (t) calculadas	Desviación	Población	PIB/población (US\$/cápita)	Intensidad de Energía (MJ/US\$)	Intensidad de Carbono (t/MJ)
Austria	62.121.252	59.142.400	4,80%	8.916.864	43.343,97	2,92	5,24E-05
Bulgaria	36.533.612	34.138.100	6,56%	6.934.015	7.958,83	4,81	1,29E-04
Suiza	34.235.224	34.916.100	-1,99%	8.638.167	84.637,01	1,70	2,82E-05
Alemania	647.252.300	603.350.500	6,78%	83.160.871	41.601,97	2,77	6,31E-05
España	213.625.420	202.705.800	5,11%	47.365.655	24.829,65	2,74	6,28E-05
Finlandia	37.735.000	36.329.900	3,72%	5.529.543	44.984,73	5,21	2,80E-05
Francia	281.539.040	267.154.700	5,11%	67.571.107	35.806,62	3,27	3,38E-05
Grecia	55.619.772	51.002.200	8,30%	10.698.599	17.283,25	2,93	9,41E-05
Croacia	16.870.528	15.626.900	7,37%	4.047.680	13.157,97	3,25	9,03E-05
Hungría	47.335.468	44.769.300	5,42%	9.750.149	14.437,81	3,66	8,69E-05
Irlanda	35.123.776	33.742.200	3,93%	4.985.382	79.441,71	1,24	6,85E-05
Italia	303.281.280	281.286.800	7,25%	59.438.851	29.375,04	2,54	6,34E-05
Lituania	13.538.674	11.693.800	13,63%	2.794.885	17.247,54	3,08	7,87E-05
Países Bajos	136.684.620	130.315.100	4,66%	17.441.500	46.303,22	3,14	5,15E-05
Noruega	41.231.000	36.177.400	12,26%	5.379.475	75.287,21	3,54	2,53E-05
Polonia	302.437.100	279.223.800	7,68%	37.899.070	14.774,99	3,54	1,41E-04
Rumanía	74.026.536	68.664.000	7,24%	19.265.250	10.898,92	2,46	1,33E-04
Serbia	45.169.760	46.324.300	-2,56%	6.899.126	6.552,08	5,40	1,90E-04
Turquía	412.926.880	407.406.200	1,34%	83.384.680	12.179,66	2,62	1,53E-04
TOTAL	2.797.287.242	2.643.969.500	5,48%				

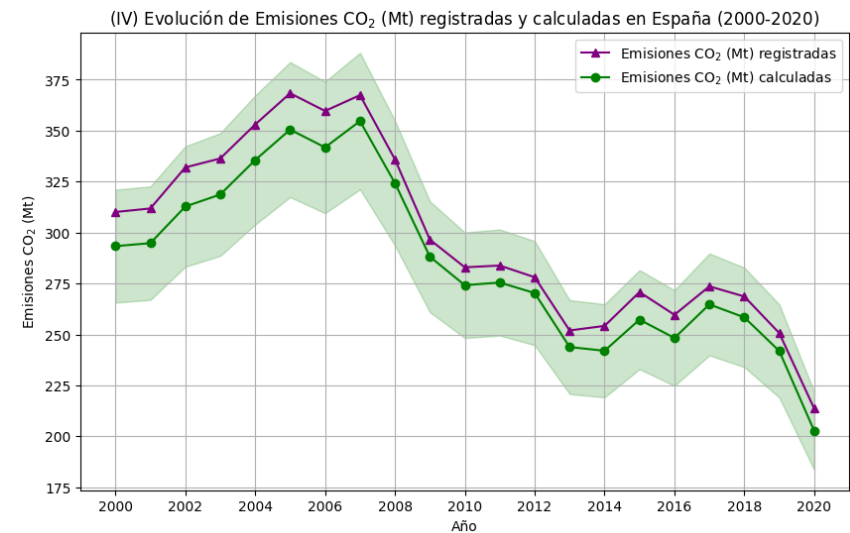
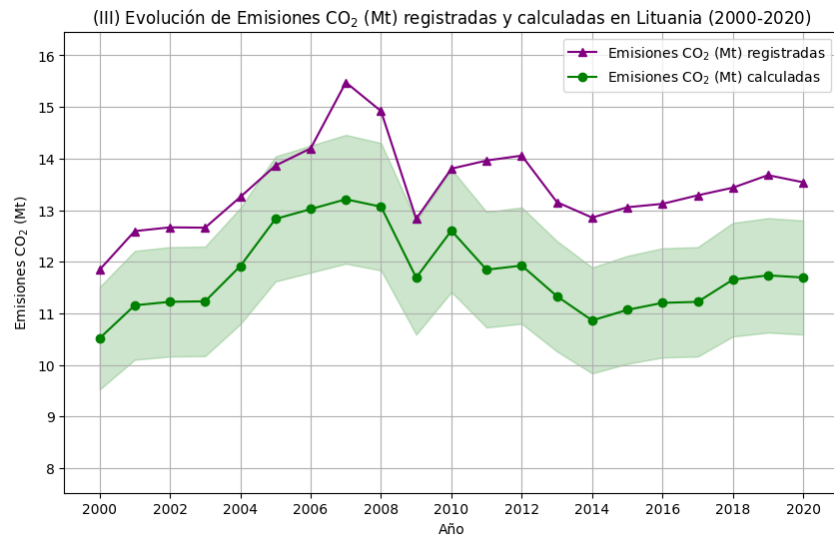
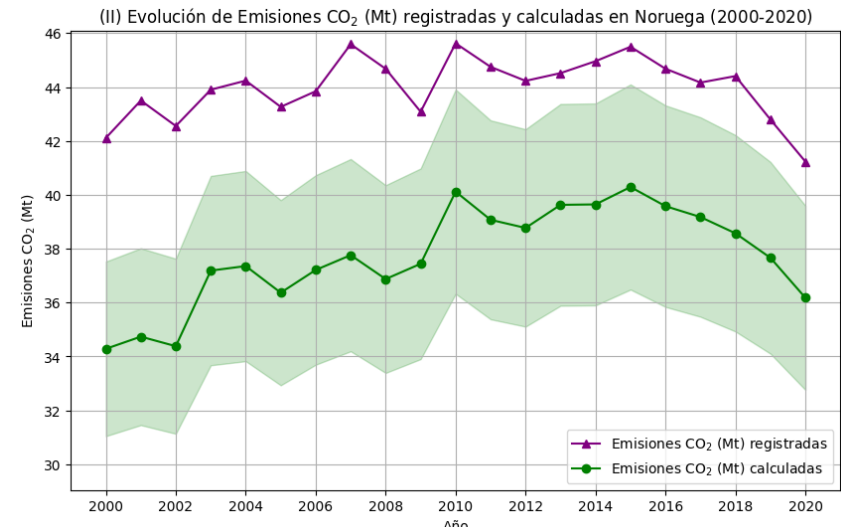
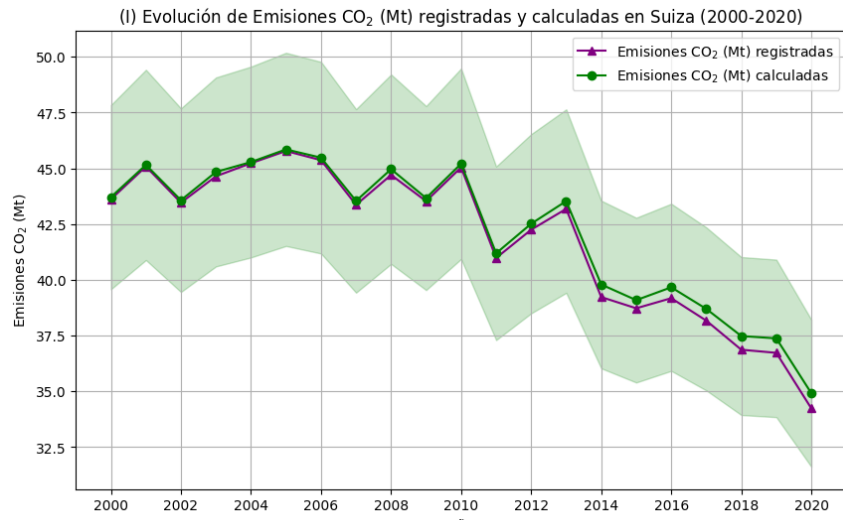


Figura 7. Gráficas de evolución temporal comparando las emisiones de CO₂ calculadas frente a los datos originales (Elaboración propia).

3. Planteamiento de escenarios futuros

El planteamiento de escenarios futuros de emisiones de CO₂, en primera instancia, se va a llevar a cabo aplicando modificaciones sobre cada factor de Kaya por separado mientras el resto se mantienen siguiendo la línea de tendencia histórica extrapolada de los últimos años. De esta manera, se analizará el impacto que puede llegar a alcanzar cada variable individualmente sobre el total de emisiones estimadas. Este tipo de enfoque se denomina “bottom-up”, y se basa en proyectar las trayectorias de cada factor de la descomposición de forma separada para posteriormente estudiar su efecto agregado sobre las emisiones totales (IPCC, 2023).

Para cada escenario, se realizará el cálculo porcentual de la variación anual de las emisiones entre los años 2025 y 2050, así como la reducción que se alcanzaría en el año 2050 sobre las emisiones registradas del año 1990 – año de referencia para los objetivos propuestos por la Comisión Europea-. Posteriormente, se plantearán objetivos de reducción de emisiones de CO₂ en determinados horizontes temporales, tomando como base los objetivos climáticos de la UE, y se analizarán distintas posibilidades para conseguirlos, buscando las combinaciones óptimas de los factores de la identidad de Kaya para alcanzar los escenarios más sostenibles.

Para obtener una perspectiva más completa, se van a desarrollar por separado los escenarios utilizando los siguientes muestreos de datos: de España en particular, de la suma de los datos de los 19 países europeos del muestreo inicial y, por último, de tres agrupaciones de países del muestreo en función de su PIB per cápita:

- España: se van a tomar los datos recopilados de los factores de Kaya correspondientes a España en particular.
- Total de Europa: se van a obtener los datos totales de los factores de Kaya del muestreo realizado con 19 países de Europa a partir de la suma de la población, PIB, consumo energético y emisiones de CO₂ de cada país.

- Clasificación en función de la riqueza: se van a agrupar los países muestreados en tres categorías según el valor de su PIB per cápita del año 2023. Para ello, se va a utilizar el método estadístico de los cuartiles, donde los países que pertenezcan al 25 % de la muestra con mayor PIB per cápita se denominarán de “Riqueza alta”, mientras que los del 25 % menor corresponderán a “Riqueza baja”. El resto, situados en el 50 % central de la distribución de datos, se consideran de “Riqueza Media”. La figura 8 muestra los resultados de la clasificación realizada.

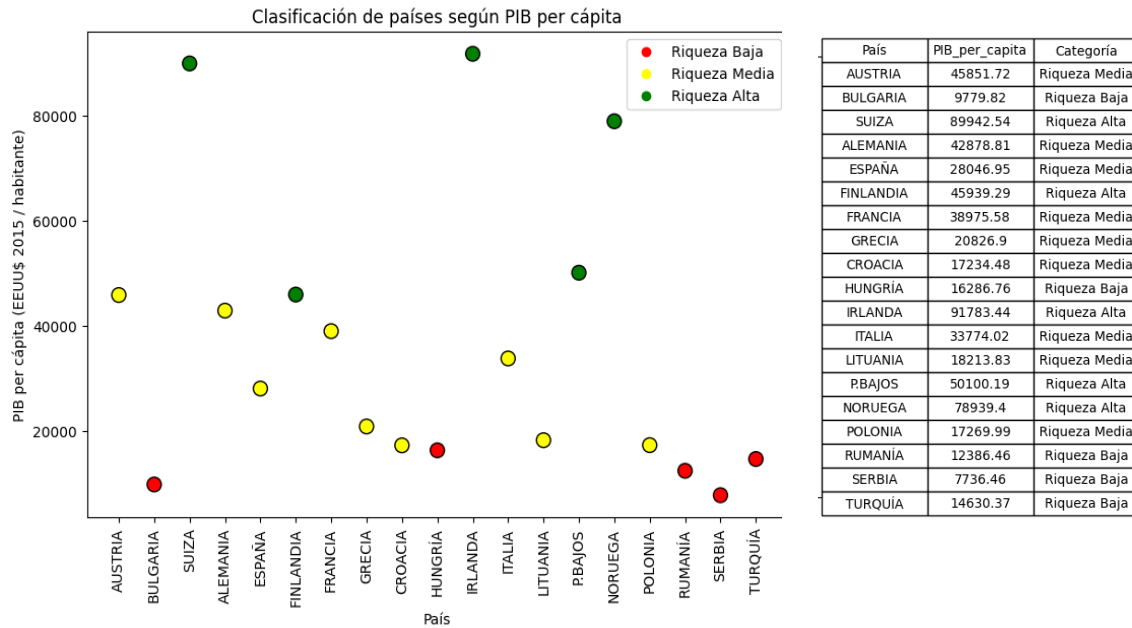


Figura 8. Clasificación de los países muestreados en función de su nivel de riqueza (Elaboración propia)

3.1. Tendencia evolutiva de los factores de Kaya

La tendencia histórica que siguen la población, PIB per cápita, consumo energético y emisiones de CO₂ se ha obtenido de aplicar el método de regresión lineal sobre los datos desde el año 2000 hasta el último disponible en los registros. En cada caso se representa la ecuación de la línea de tendencia junto al coeficiente de determinación de la sucesión, que se utilizará para obtener los valores extrapolados hasta el año 2050 y el porcentaje de variación anual que experimenta el factor analizado. La predicción de datos de intensidad energética e intensidad de carbono se obtienen a partir del PIB, consumo energético y emisiones de CO₂ estimados.

Finalmente, los años con datos más extremos por circunstancias puntuales, como la crisis económica de 2008 y la pandemia de 2020, se han eliminado del ajuste en algunos casos. Los resultados de los cálculos de la extrapolación y las representaciones gráficas se muestran en las tablas 4, 5, 6, 7, 8 y 9; y en las figuras 9, 10, 11 y 12.

- Población: la evolución histórica muestra una ligera tendencia al alza, aunque cada vez se aproxima más a una situación de estabilidad.

Tabla 4. Cálculo de los valores extrapolados de población en 2025-2050 y porcentaje de variación medio anual (Elaboración propia).

	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Var. % anual
España	49543057	51139382	52735708	54332033	55928359	57524684	0,56%
Europa	501100749	509390642	517680535	525970428	534260321	542550214	0,31%
Riqueza Alta	43401901	44787514	46173128	47558741	48944355	50329968	0,55%
Riqueza Media	326132960	329702278	333271596	336840914	340410231	343979549	0,21%
Riqueza Baja	129069738	132550893	136032049	139513204	142994359	146475515	0,48%

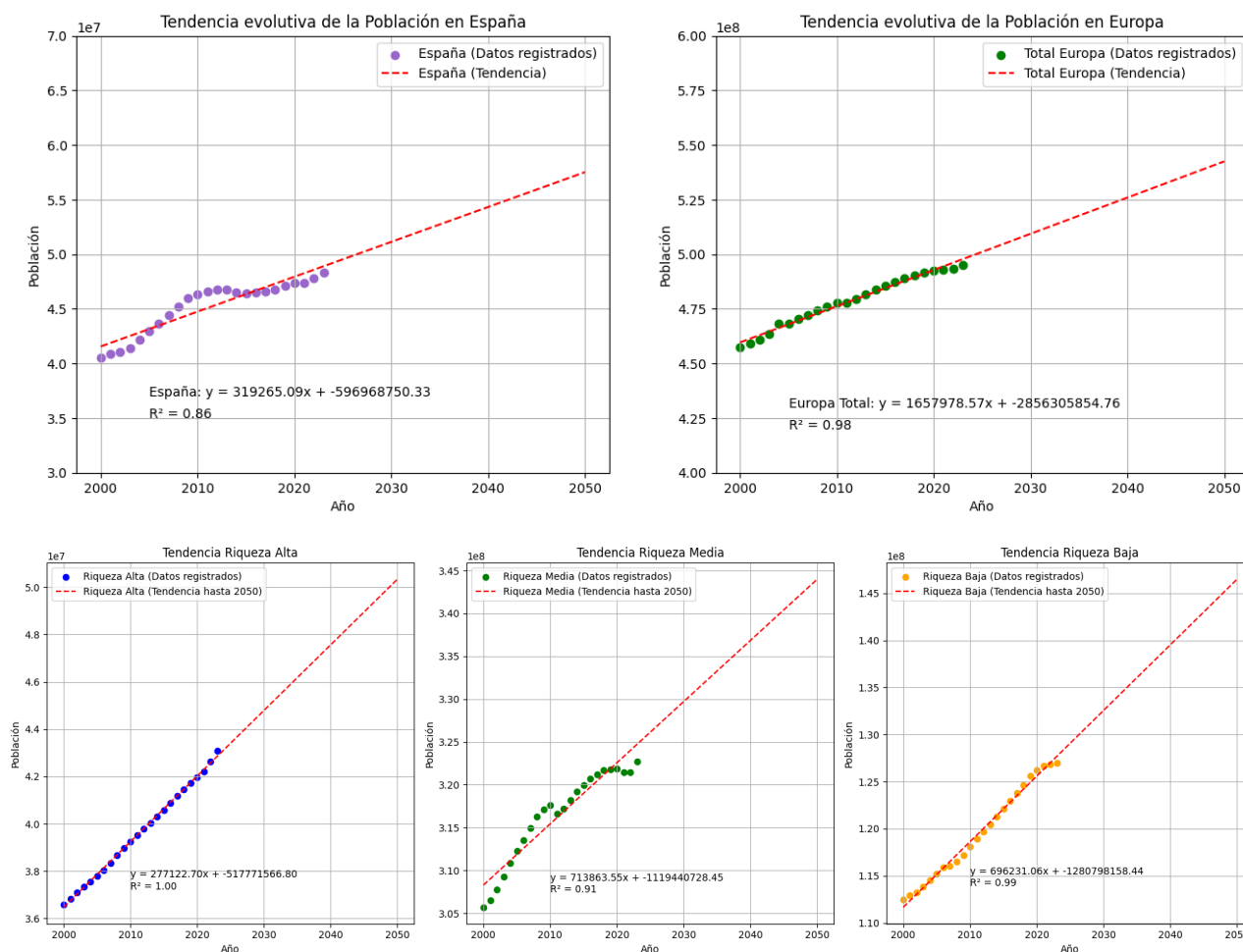


Figura 9. Representación del ajuste de regresión lineal y líneas de tendencia de los datos registrados de población entre 2000 y 2023 (Elaboración propia).

- Producto Interior Bruto per cápita: el crecimiento económico sigue una tendencia positiva sostenida, a excepción de eventos aislados. Es esperable que los países de menor PIB per cápita (Riqueza Baja) experimenten un incremento anual mayor, ya que se encuentran en plena fase de desarrollo.

Tabla 5. Cálculo de los valores extrapolados de PIB per cápita (EEUU\$ 2015/ habitante) en 2025-2050 y porcentaje de variación medio anual (Elaboración propia).

	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Var. % anual
España	28709	29808	30906	32005	33103	34202	0,64%
Europa	31577	33021	34465	35909	37353	38797	0,74%
Riqueza Alta	66428	69777	73127	76476	79826	83175	0,81%
Riqueza Media	33980	35131	36282	37432	38583	39733	0,58%
Riqueza Baja	13798	15472	17147	18821	20496	22170	1,51%

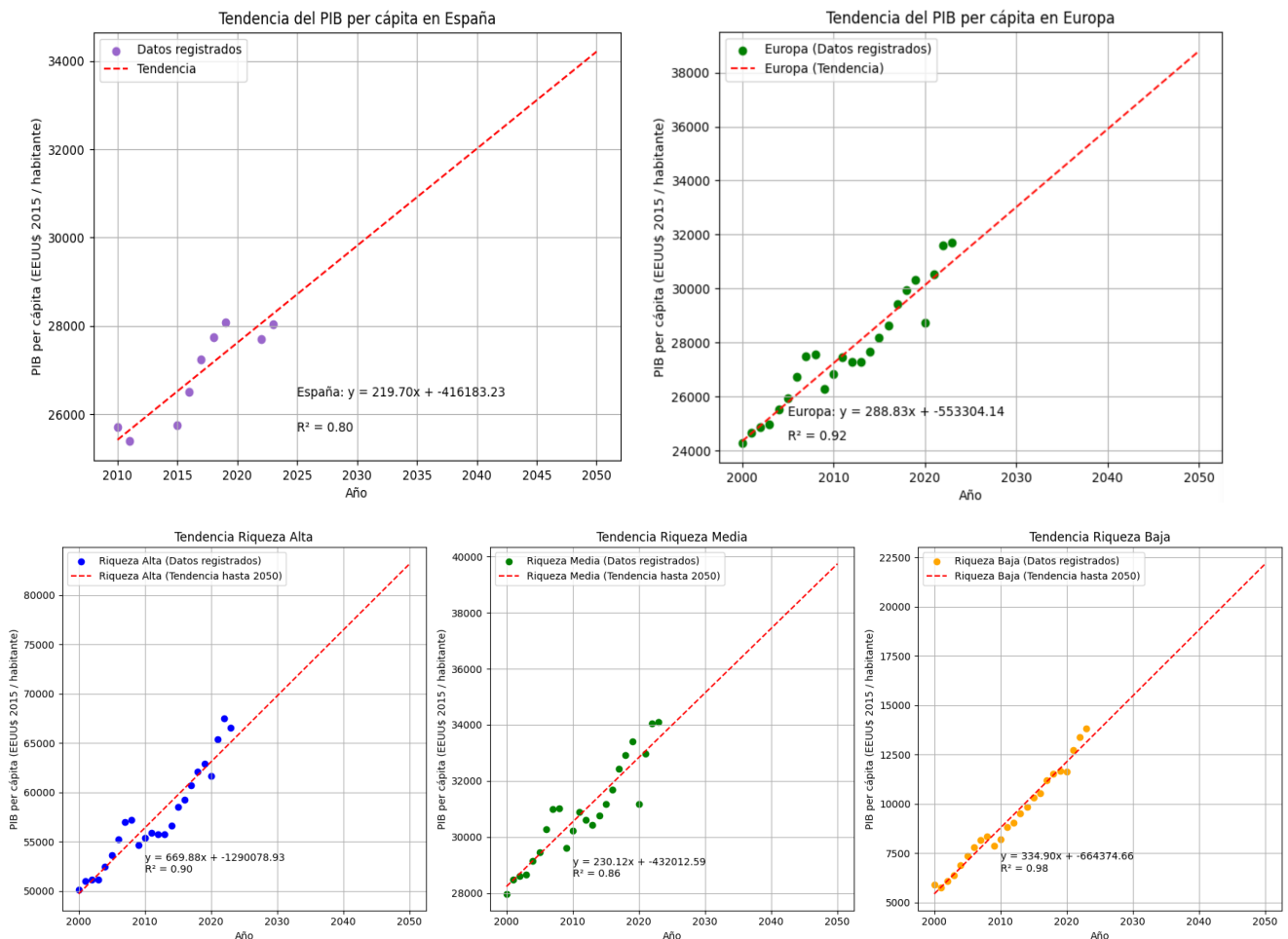


Figura 10. Representación del ajuste de regresión lineal y líneas de tendencia de los datos registrados de PIB per cápita entre 2000 y 2023 (Elaboración propia).

- Consumo Energético: la energía consumida por cada país se encuentra muy ligada a su actividad económica, aunque presenta una tendencia decreciente gracias a las medidas ya implementadas de mejora de eficiencia energética. La excepción son los países de menor riqueza, que todavía mantienen un crecimiento del consumo energético en positivo.

Tabla 6. Cálculo de los valores extrapolados de consumo energético (TJ) en 2025-2050 y porcentaje de variación medio anual (Elaboración propia).

	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Var. % anual
España	3300450	3129340	2958230	2787120	2616010	2444900	-1,40%
Europa	40797000	39364400	37931800	36499200	35066600	33634000	-0,85%
Riqueza Alta	7056125	6809350	6562575	6315800	6069025	5822250	-0,85%
Riqueza Media	28810250	27128300	25446350	23764400	22082450	20400500	-1,65%
Riqueza Baja	4797550	5140260	5482970	5825680	6168390	6511100	1,05%

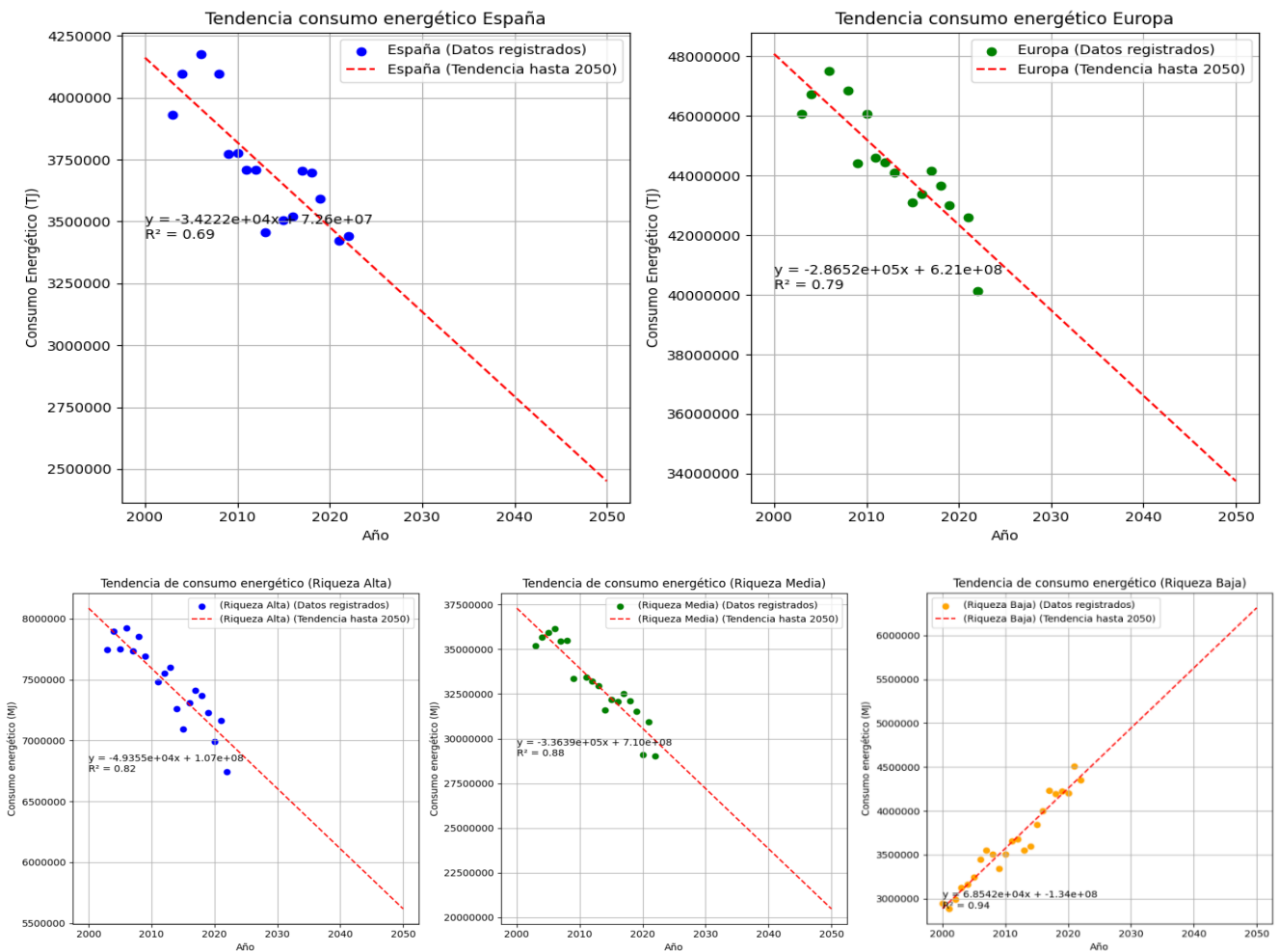


Figura 11. Representación del ajuste de regresión lineal y líneas de tendencia de los datos registrados de PIB per cápita entre 2000 y 2023 (Elaboración propia).

- Emisiones de CO₂: de igual manera que el consumo energético, las emisiones totales de CO₂ tienden a descender año tras año conforme se van tomando medidas en la UE, tales como el uso creciente de energías renovables en lugar de combustibles fósiles.

Tabla 7. Cálculo de los valores extrapolados de emisiones de CO₂ (Mt) en 2025-2050 y porcentaje de variación medio anual (Elaboración propia).

	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Var. % anual
España	230	215	200	186	171	156	-1,89%
Europa	2867	2789	2712	2634	2556	2478	-0,63%
Riqueza Alta	295	280	265	250	235	219	-1,38%
Riqueza Media	1831	1688	1544	1401	1258	1114	-2,57%
Riqueza Baja	658	701	745	788	832	876	1,00%

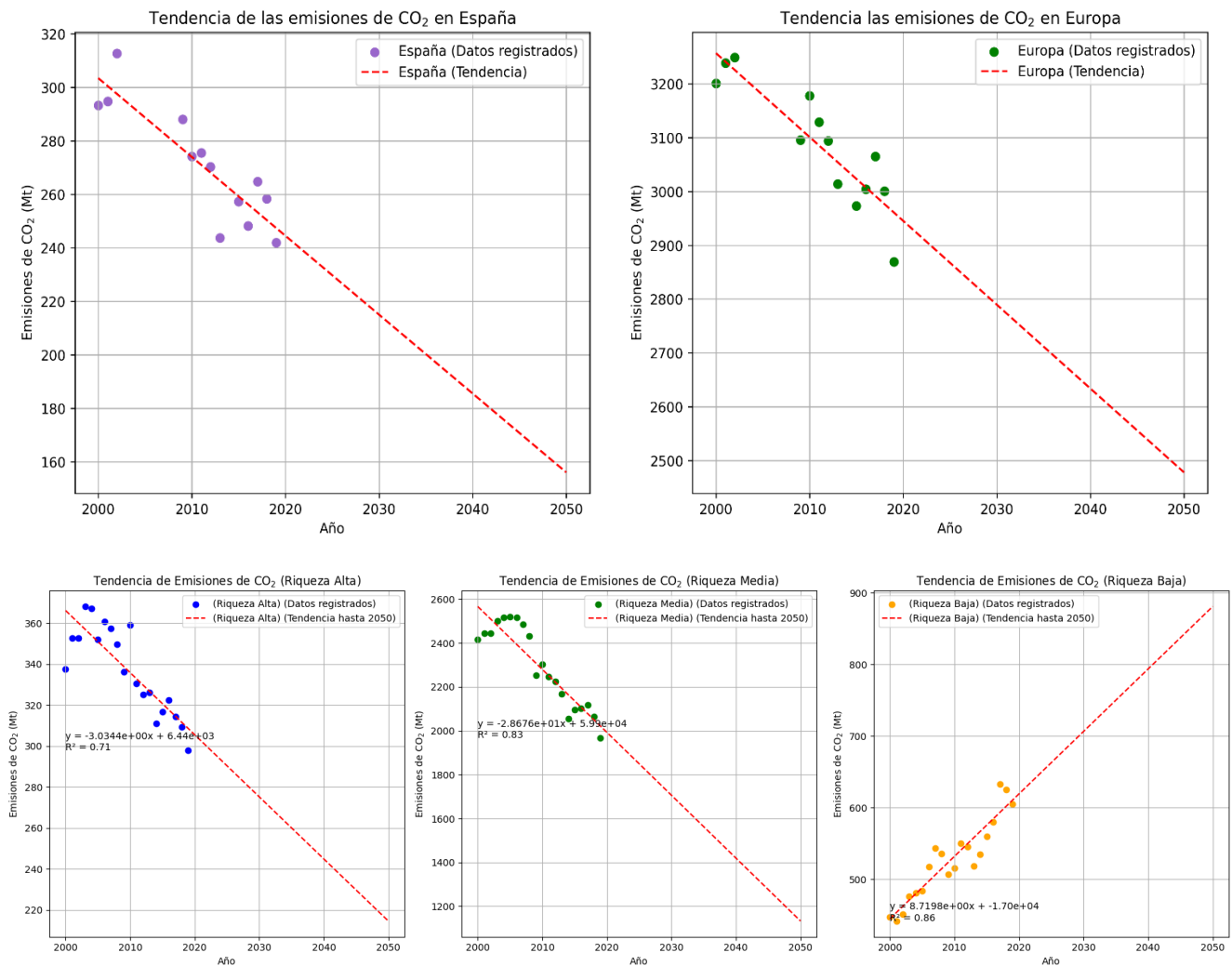


Figura 12. Representación del ajuste de regresión lineal y líneas de tendencia de los datos registrados de emisiones de CO₂ (Mt) entre 2000 y 2023 (Elaboración propia).

- **Intensidad energética:** la tendencia evolutiva de la intensidad de energía se obtiene de dividir la extrapolación del consumo energético en Megajulios (tabla 6) entre el PIB estimado –resultante de multiplicar PIB per cápita (tabla 5) y población (tabla 4)–.

Tabla 8. Cálculo de los valores extrapolados de intensidad energética (MJ/US\$) en 2025-2050 y porcentaje de variación medio anual (Elaboración propia).

	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Var. % anual
<i>España</i>	2,32	2,05	1,82	1,60	1,41	1,24	-3,47%
<i>Europa</i>	2,58	2,34	2,13	1,93	1,76	1,60	-2,45%
<i>Riqueza Alta</i>	2,45	2,18	1,94	1,74	1,55	1,39	-3,04%
<i>Riqueza Media</i>	2,60	2,34	2,10	1,88	1,68	1,49	-2,97%
<i>Riqueza Baja</i>	2,69	2,51	2,35	2,22	2,10	2,01	-1,37%

- **Intensidad de Carbono:** la extrapolación de los datos de intensidad de carbono proviene de la división de la estimación de las emisiones de CO₂ (tabla 7), medida en kilogramos, y el consumo energético (tabla 5) expresado en Megajulios.

Tabla 9. Cálculo de los valores extrapolados de intensidad de carbono (kg/MJ) en 2025-2050 y porcentaje de variación medio anual (Elaboración propia).

	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Var. % anual
<i>España</i>	0,070	0,069	0,068	0,067	0,065	0,064	-0,36%
<i>Europa</i>	0,070	0,071	0,071	0,072	0,073	0,074	0,18%
<i>Riqueza Alta</i>	0,042	0,041	0,040	0,040	0,039	0,038	-0,44%
<i>Riqueza Media</i>	0,064	0,062	0,061	0,059	0,057	0,055	-0,65%
<i>Riqueza Baja</i>	0,137	0,136	0,136	0,135	0,135	0,134	-0,08%

3.2. Escenarios

La tabla 10 incluye los escenarios inicialmente planteados teniendo en cuenta tanto los valores de variación obtenidos del análisis de las tendencias como los objetivos europeos establecidos en el paquete “Fit for 55”. En los escenarios del 1 al 4 se evalúa cada factor de Kaya por separado, utilizando estimaciones razonables de cada uno de ellos; mientras que en los escenarios 5 se estudia la posibilidad de cumplir con los objetivos de reducción de emisiones de la UE de un 55 % en 2030, 90 % en 2040 y neutralidad climática en 2050 combinando modificaciones en todos los factores. Finalmente, se analizará la necesidad de implementar medidas de captura y almacenamiento de dióxido de carbono, en línea con lo propuesto en el Acuerdo de París y en el último informe del IPCC.

Tabla 10. Escenarios futuros de emisiones de CO₂ planteados (Elaboración propia).

Nº Escenario	Factor definido	Valor	Horizonte temporal
1.a	Población	-1 % / año	2020 - 2050
1.b		Estable	2020 - 2050
1.c		+0,5 % / año	2020 - 2050
2.a	PIB / Población	-0,5 % / año	2020 - 2050
2.b		+ 0,5 % / año	2020 - 2050
2.c		+ 1 % / año	2020 - 2050
3.a	Intensidad de energía	-2% / año	2020 - 2050
3.b		-1,49 % / año	2020 - 2050
3.c		-1 % / año	2020 - 2050
4.a	Intensidad de carbono	-2,6 % / año	2020 - 2050
4.b		-1 % / año	2020 - 2050
4.c		-0,5 % / año	2020 - 2050
5.a	Emisiones de CO ₂	-55% respecto a 1990	2020 - 2030
5.b		-90% respecto a 1990	2020 - 2040
5.c		-100% respecto a 1990	2020 - 2050

3.2.1. Escenarios modificando el factor población (1.a, 1.b y 1.c).

Los escenarios 1.a, 1.b y 1.c pretenden mostrar la influencia del crecimiento, estabilidad o decrecimiento poblacional sobre el total de emisiones de CO₂. La población en Europa durante los últimos años ha tendido a la estabilización, con tasas de natalidad cada vez más decrecientes compensadas por los movimientos de inmigración. Se estima que, a partir de 2030, ya se habrá superado el punto máximo y el número de habitantes comenzará a disminuir gradualmente (Servicio Europeo de Acción Exterior, 2020).

La tabla 11 muestra la variación anual de las emisiones de CO₂ y el total respecto al año 1990 para cada escenario, y la figura 13 incluye las gráficas de evolución temporal de los tres escenarios superpuestas. Tal y como se puede observar, un decrecimiento poblacional razonable (escenario 1.a) podría llegar a reducir a la mitad las emisiones de la muestra de Europa en el año 2050 manteniendo el resto de factores con su tendencia actual. No obstante, también se reduciría el total de CO₂ emitido manteniendo una población estable (escenario 1.b) o incluso un crecimiento ligero (escenario 1.a), a excepción de los países con menor índice de riqueza debido a su mayor proyección de crecimiento económico.

Se puede concluir que la variación del factor de la población en la ecuación de Kaya tiene un impacto relativamente pequeño en el total de emisiones de CO₂, además de constituir un parámetro de evolución lenta y complejo de controlar desde el ámbito político.

Tabla 11. Variación anual y total de emisiones de CO₂ relativa a diferentes variaciones en población descritas en escenarios 1.a, 1.b y 1.c (Elaboración propia).

Escenarios:	Variación anual media (2025-2050)			Variación total respecto a 1990		
	1.a	1.b	1.c	1.a	1.b	1.c
<i>España</i>	-2,20%	-1,67%	-1,37%	-55%	-42%	-34%
<i>Europa</i>	-1,51%	-0,78%	-0,35%	-50%	-35%	-27%
<i>Riqueza Alta</i>	-2,01%	-1,43%	-1,09%	-56%	-43%	-35%
<i>Riqueza Media</i>	-2,22%	-1,70%	-1,39%	-70%	-61%	-55%
<i>Riqueza Baja</i>	-0,37%	0,70%	1,31%	11%	44%	63%

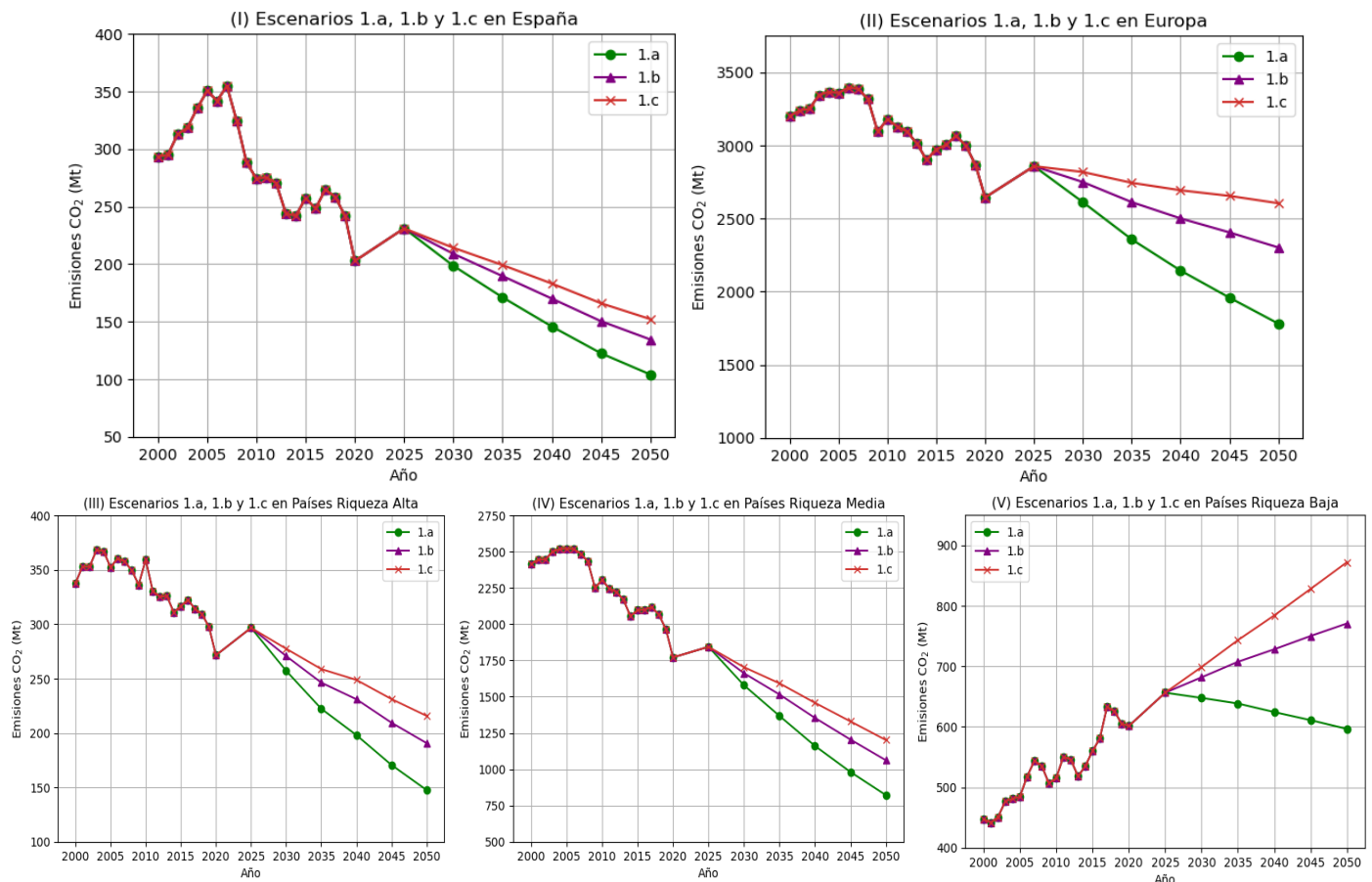


Figura 13. Gráficas de evolución de emisiones de CO₂ siguiendo los escenarios 1.a, 1.b y 1.c.
(Elaboración propia).

3.2.2. Escenarios modificando el factor PIB per cápita (2.a, 2.b y 2.c)

El efecto del crecimiento económico de los países se analiza en los escenarios 2.a, 2.b y 2.c mediante la modificación del PIB per cápita, proponiendo dos escenarios de crecimiento y uno de decrecimiento económico. En el informe AR6 del IPCC se considera por primera vez el concepto de decrecimiento sostenible, consistente en una reducción controlada tanto del PIB como de las emisiones, en lugar de desvincular el desarrollo económico de un país de los objetivos climáticos. Algunas estrategias de decrecimiento sostenible serían la distribución de permisos de emisión en una base anual decreciente y establecer legislaciones sobre los límites de presupuesto de carbono (Parrique, 2022).

Como se muestra en la tabla 12 y figura 14, un escenario con un PIB per cápita ligeramente decreciente de -0,5 % anual (escenario 2.a) alcanzaría a reducir a la mitad las emisiones de CO₂ en el año 2050, y hasta casi un 70% en los países de riqueza media. Esta

medida, combinada con reducciones en la intensidad de energía y de carbono, podría alcanzar niveles importantes de disminución. No obstante, cabe considerar que el escenario de decrecimiento económico debería aplicarse en los países de mayor PIB per cápita, permitiendo a los de menor desarrollo económico mantener un crecimiento moderado para garantizar la equidad en las políticas aplicadas.

Tabla 12. Variación anual y total de emisiones de CO₂ relativa a diferentes variaciones en PIB per cápita descritas en escenarios 2.a, 2.b y 2.c (Elaboración propia).

Escenarios:	Variación anual media (2025-2050)			Variación total respecto a 1990		
	2.a	2.b	2.c	2.a	2.b	2.c
España	-2,00%	-1,43%	-1,10%	-50%	-36%	-27%
Europa	-1,50%	-0,79%	-0,38%	-50%	-36%	-27%
Riqueza Alta	-1,90%	-1,31%	-0,96%	-53%	-40%	-32%
Riqueza Media	-2,17%	-1,65%	-1,35%	-69%	-60%	-55%
Riqueza Baja	-1,08%	-0,25%	0,23%	-11%	15%	30%

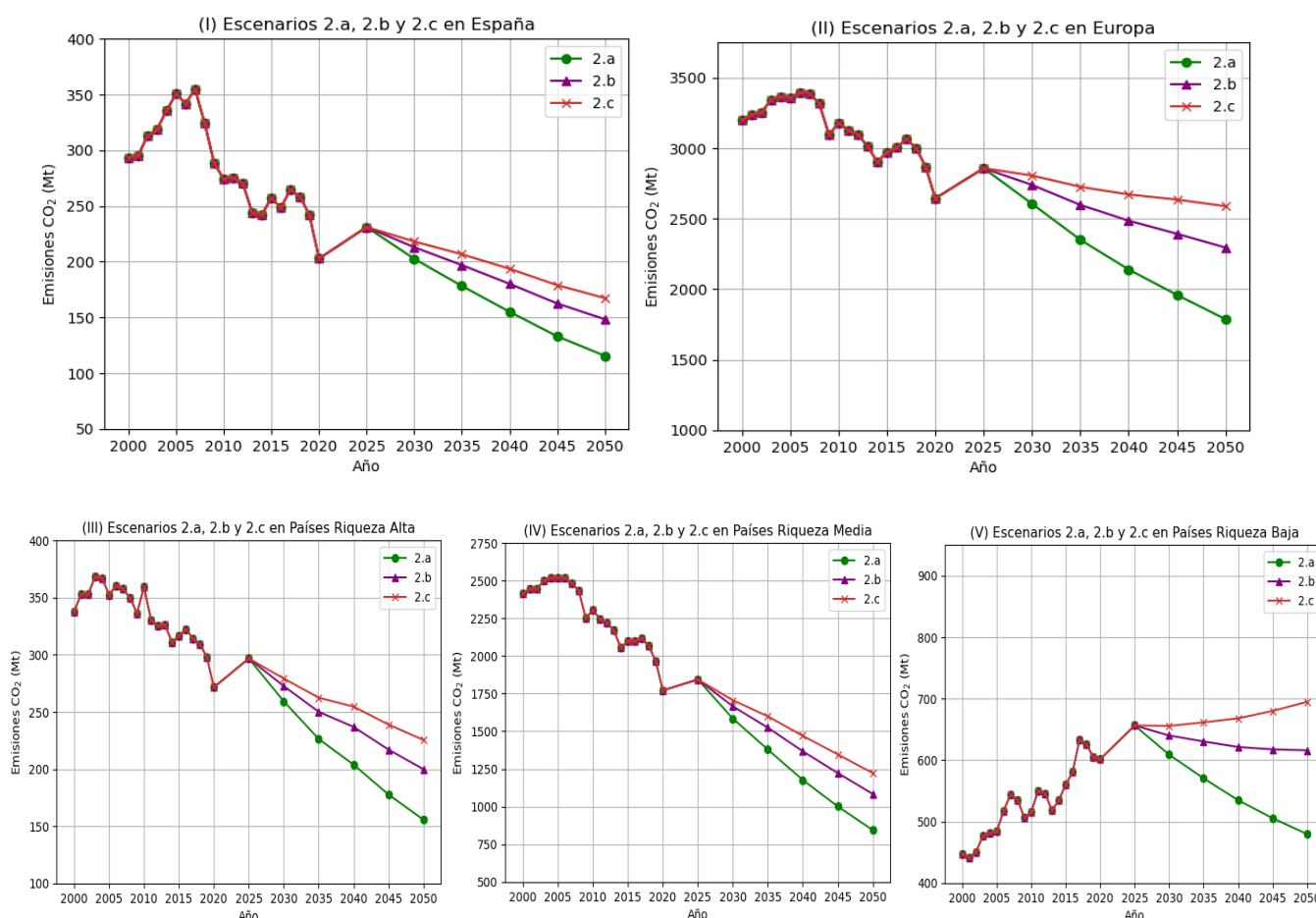


Figura 14. Gráficas de evolución de emisiones de CO₂ siguiendo los escenarios 2.a, 2.b y 2.c. (Elaboración propia).

3.2.3. Escenarios modificando el factor de Intensidad de Energía (3.a, 3.b y 3.c)

La intensidad energética se analiza en los escenarios 3.a, 3.b y 3.c, siendo el 3.b el correspondiente al objetivo europeo de reducir 1,49 % anualmente este parámetro hasta 2030. Este factor, relacionado con la eficiencia energética de la actividad económica de cada país, ha descendido notablemente entre los años 2000 y 2022 en Europa. Sin embargo, el ritmo de disminución se ha ido desacelerando –especialmente en los países de mayor PIB– debido a que la mayoría de las medidas más accesibles para mejorarla ya han sido aplicadas, tales como: el incremento de la eficiencia energética de equipos y edificios, la electrificación y optimización de procesos industriales, el etiquetado energético o cambios económicos estructurales virando hacia el sector servicios. Actualmente quedan por delante sectores más complejos y lentos de descarbonizar, como la industria y transporte pesados o la aviación. Como consecuencia, cabe esperar que la intensidad energética disminuya en menor grado en el futuro respecto a los últimos años, especialmente en los países con mayor nivel de riqueza, mientras que los países con menor PIB tienen mayor margen de mejora.

En la tabla 13 y la figura 15 se muestran los resultados de los escenarios propuestos. Se puede observar como el nivel de riqueza de los países influye notablemente en el efecto que tiene la variación de la intensidad energética, siendo los de riqueza media donde más disminución anual de emisiones de CO₂ se genera. Esto se debe a que los países de riqueza alta ya cuentan con una eficiencia energética elevada y un mayor crecimiento del PIB anual. Por tanto, para reducir sus emisiones mediante la intensidad energética, tendrían que disminuir considerablemente su consumo energético o asumir un decrecimiento económico. Por otro lado, los países con menores rentas tienen peor eficiencia energética y mayor expectativa de crecimiento económico anual en los próximos años, por lo que se espera que su consumo energético crezca.

Se puede concluir que el factor de intensidad energética, de forma independiente, tiene un margen de mejora cada vez más limitado sobre el total de emisiones, ya que está condicionado por el crecimiento económico. De esta manera, se refuerza la postura contemplada en el informe AR6 sobre la necesidad de un decrecimiento sostenible en los países más desarrollados, que combine mejora de la eficiencia energética con un decrecimiento controlado del PIB.

Tabla 13. Variación anual y total de emisiones de CO₂ relativa a diferentes variaciones en Intensidad Energética descritas en escenarios 3.a, 3.b y 3.c (Elaboración propia).

Escenarios:	Variación anual media (2025-2050)			Variación total respecto a 1990		
	3.a	3.b	3.c	3.a	3.b	3.c
España	-0,67%	-0,56%	-0,09%	-16%	-14%	-2%
Europa	-0,29%	-0,18%	0,35%	-26%	-23%	-13%
Riqueza Alta	-0,54%	-0,43%	0,07%	-23%	-20%	-9%
Riqueza Media	-1,21%	-1,12%	-0,72%	-52%	-51%	-44%
Riqueza Baja	0,70%	0,84%	1,52%	44%	48%	69%

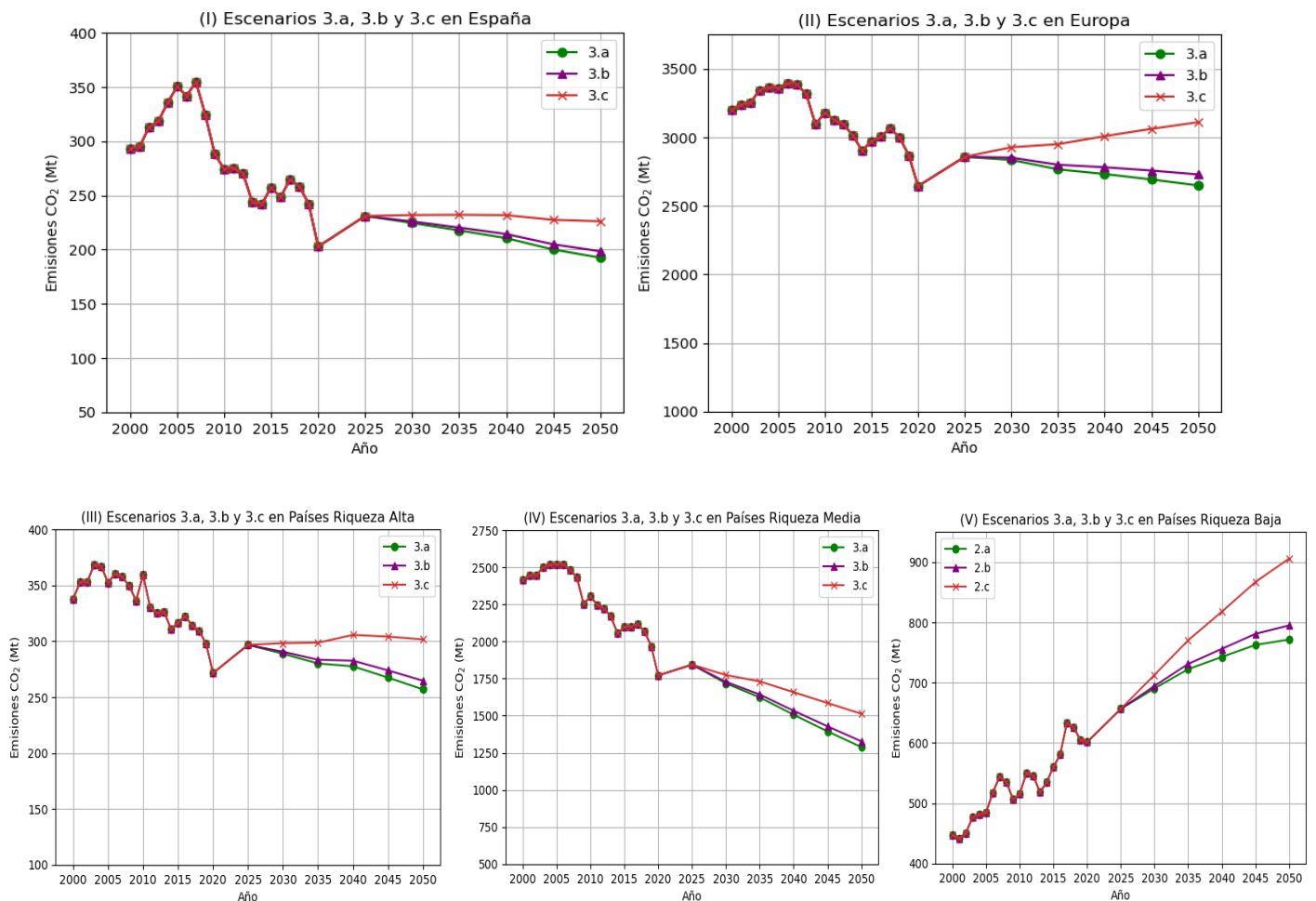


Figura 15. Gráficas de evolución de emisiones de CO₂ siguiendo los escenarios 3.a, 3.b y 3.c. (Elaboración propia).

3.2.4. Escenarios modificando el factor de Intensidad de Carbono (4.a, 4.b y 4.c)

En los escenarios 4.a, 4.b y 4.c se simula el efecto de la variación de la intensidad de carbono. El escenario más optimista planteado (4.a) se corresponde con el objetivo europeo de disminuir un 26 % entre 2020 y 2030, es decir, un 2,6 % anual; mientras que los escenarios 4.b y 4.c se acercan más a los valores de variación resultantes de la extrapolación de la tendencia desde el año 2000.

La intensidad de carbono, relacionada con la descarbonización del sistema energético, es el factor de Kaya que muestra un mayor grado de reducción en el total de emisiones de Europa y España incluso en el escenario más pesimista (4.c) (tabla 14 y figura 16). Esto es debido a que es el parámetro más directamente relacionado con las emisiones de CO₂, mientras que se mantiene independiente del crecimiento económico.

No obstante, de igual manera que la intensidad energética, reducir la intensidad de carbono cada vez resulta más complicado, especialmente en los países donde ya se utilizan mayoritariamente fuentes de energía renovable. Los países de riqueza baja y que todavía dependen energéticamente de combustibles fósiles son los que mayor margen de reducción pueden contemplar en los próximos años, con escenarios incluso más optimistas que el propuesto 4.a.

Tabla 14. Variación anual y total de emisiones de CO₂ relativa a diferentes variaciones en Intensidad de Carbono descritas en escenarios 4.a, 4.b y 4.c (Elaboración propia).

Escenarios:	Variación anual media (2025-2050)			Variación total respecto a 1990		
	4.a	4.b	4.c	4.a	4.b	4.c
<i>España</i>	-2,53%	-1,71%	-1,39%	-63%	-43%	-35%
<i>Europa</i>	-2,36%	-1,45%	-1,09%	-67%	-49%	-42%
<i>Riqueza Alta</i>	-2,36%	-1,45%	-1,10%	-63%	-43%	-35%
<i>Riqueza Media</i>	-2,59%	-1,81%	-1,51%	-76%	-63%	-57%
<i>Riqueza Baja</i>	-1,28%	0,22%	0,80%	-17%	29%	47%

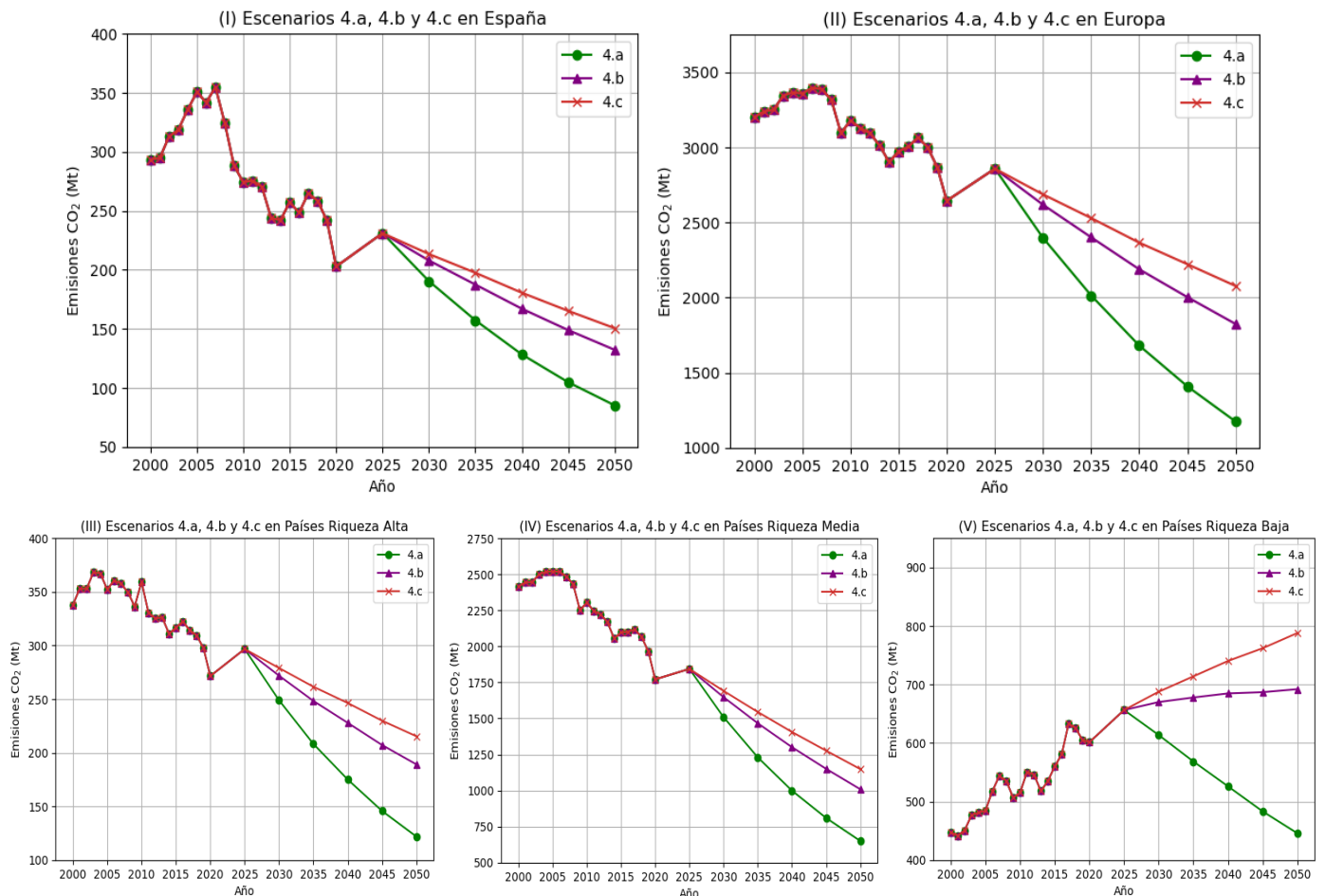


Figura 16. Gráficas de evolución de emisiones de CO₂ siguiendo los escenarios 4.a, 4.b y 4.c.
(Elaboración propia).

3.2.5. Escenarios objetivos de la UE (5.a, 5.b, 5.c)

La posibilidad de alcanzar los objetivos europeos de reducción de emisiones establecidos para los años 2030, 2040 y 2050 se analiza en los escenarios 5.a, 5.b y 5.c respectivamente. En estos casos, se representa la tendencia actual extrapolada de emisiones de CO₂ frente a la tendencia que cumpliría con los objetivos de la UE y, finalmente, la combinación de los escenarios previamente planteados que resulta más optimista. Para esta última, se consideran las siguientes variaciones anuales de los factores de Kaya de forma simultánea:

- Población: -1 % anual
- PIB per cápita: -0,5 % anual
- Intensidad energética: -2 % anual
- Intensidad de carbono: -2,6 % anual

Las tablas 15, 16 y 17 recopilan las variaciones anuales y totales que se tendrían que alcanzar para cumplir los objetivos de reducción – Objetivo UE –, así como las que se alcanzarían con los escenarios más favorables planteados – Caso más favorable – y los extrapolados de la tendencia actual – Tendencia actual –. De forma gráfica, las figuras 17, 18 y 19 comparan las tres líneas de tendencia mencionadas para cada escenario.

Tabla 15. Variación anual y total de emisiones de CO₂ en el escenario 5.a (Elaboración propia).

Tendencias:	Variación anual media (2025-2030)			Variación total en 2030 respecto a 1990		
	Objetivo UE	Caso más favorable	Tendencia actual	Objetivo UE	Caso más favorable	Tendencia actual
España	-11,03%	-5,17%	-1,33%	-55%	-26%	-6%
Europa	-8,77%	-5,17%	-0,44%	-55%	-41%	-22%
Riqueza Alta	-9,93%	-5,17%	-1,17%	-55%	-34%	-16%
Riqueza Media	-6,83%	-5,17%	-1,77%	-55%	-49%	-38%
Riqueza Baja	-12,64%	-5,17%	1,33%	-55%	-9%	31%



Figura 17. Gráficas de evolución de emisiones de CO₂ siguiendo el escenario 5.a. correspondiente al objetivo de la UE de 2030 (Elaboración propia).

Tabla 16. Variación anual y total de emisiones de CO₂ en el escenario 5.b (Elaboración propia).

Tendencias	Variación anual media (2025-2040)			Variación total en 2040 respecto a 1990		
	Objetivo UE	Caso más favorable	Tendencia actual	Objetivo UE	Caso más favorable	Tendencia actual
España	-6,00%	-3,95%	-1,29%	-90%	-59%	-19%
Europa	-5,84%	-3,95%	-0,54%	-90%	-67%	-26%
Riqueza Alta	-5,92%	-3,95%	-0,98%	-90%	-64%	-24%
Riqueza Media	-5,69%	-3,95%	-1,61%	-90%	-72%	-48%
Riqueza Baja	-6,12%	-3,95%	1,33%	-90%	-50%	47%

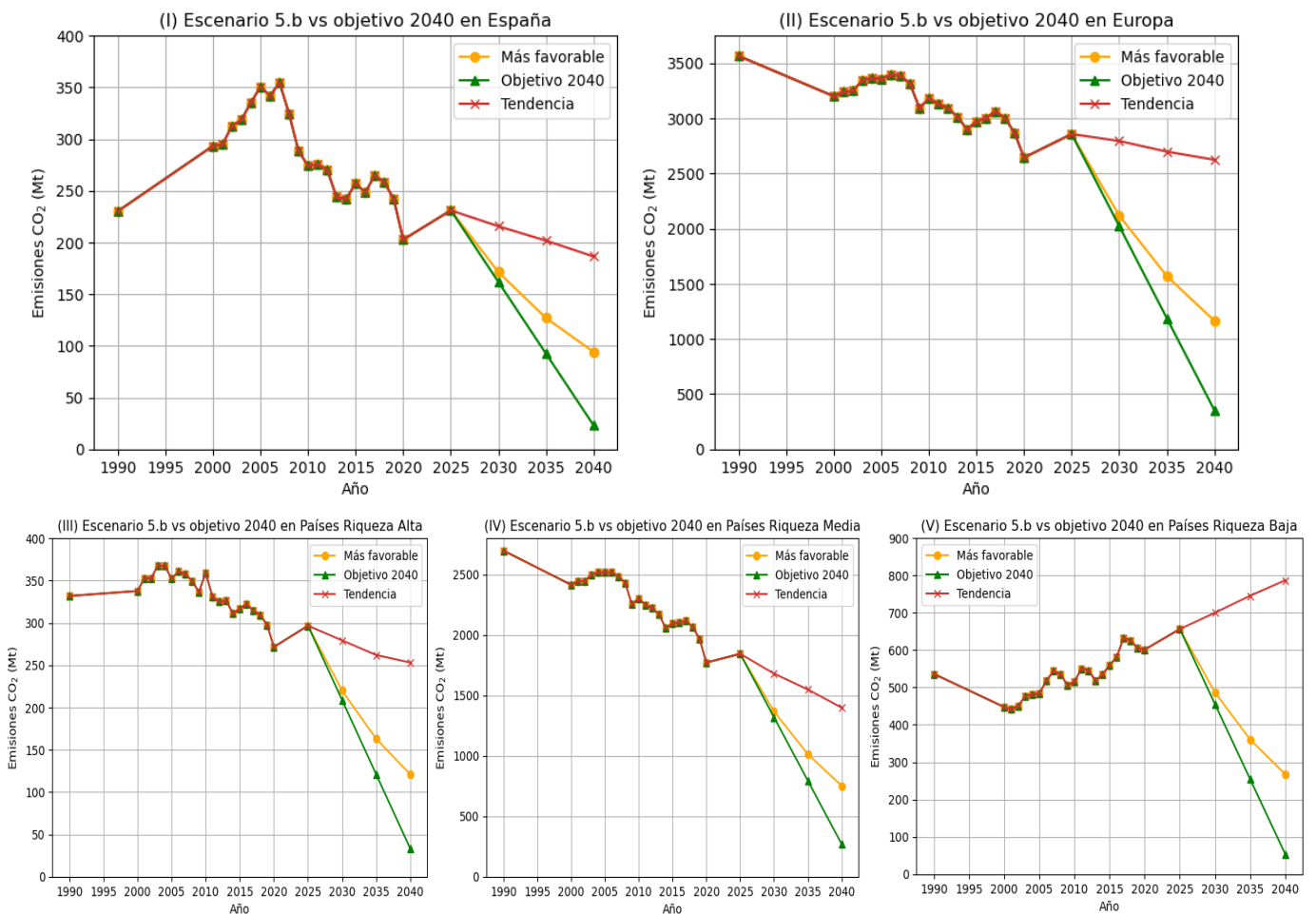


Figura 18. Gráficas de evolución de emisiones de CO₂ siguiendo el escenario 5.b. correspondiente al objetivo de la UE de 2040 (Elaboración propia).

Tabla 17. Variación anual y total de emisiones de CO₂ en el escenario 5.c (Elaboración propia).

Tendencias	Variación anual media (2025-2050)			Variación total en 2050 respecto a 1990		
	Objetivo UE	Caso más favorable	Tendencia actual	Objetivo UE	Caso más favorable	Tendencia actual
España	-4,00%	-3,10%	-1,30%	-100%	-78%	-32%
Europa	-4,01%	-3,10%	-0,51%	-100%	-82%	-30%
Riqueza Alta	-4,00%	-3,10%	-1,02%	-100%	-80%	-33%
Riqueza Media	-3,99%	-3,10%	-1,57%	-100%	-85%	-58%
Riqueza Baja	-4,00%	-3,10%	1,33%	-100%	-73%	63%

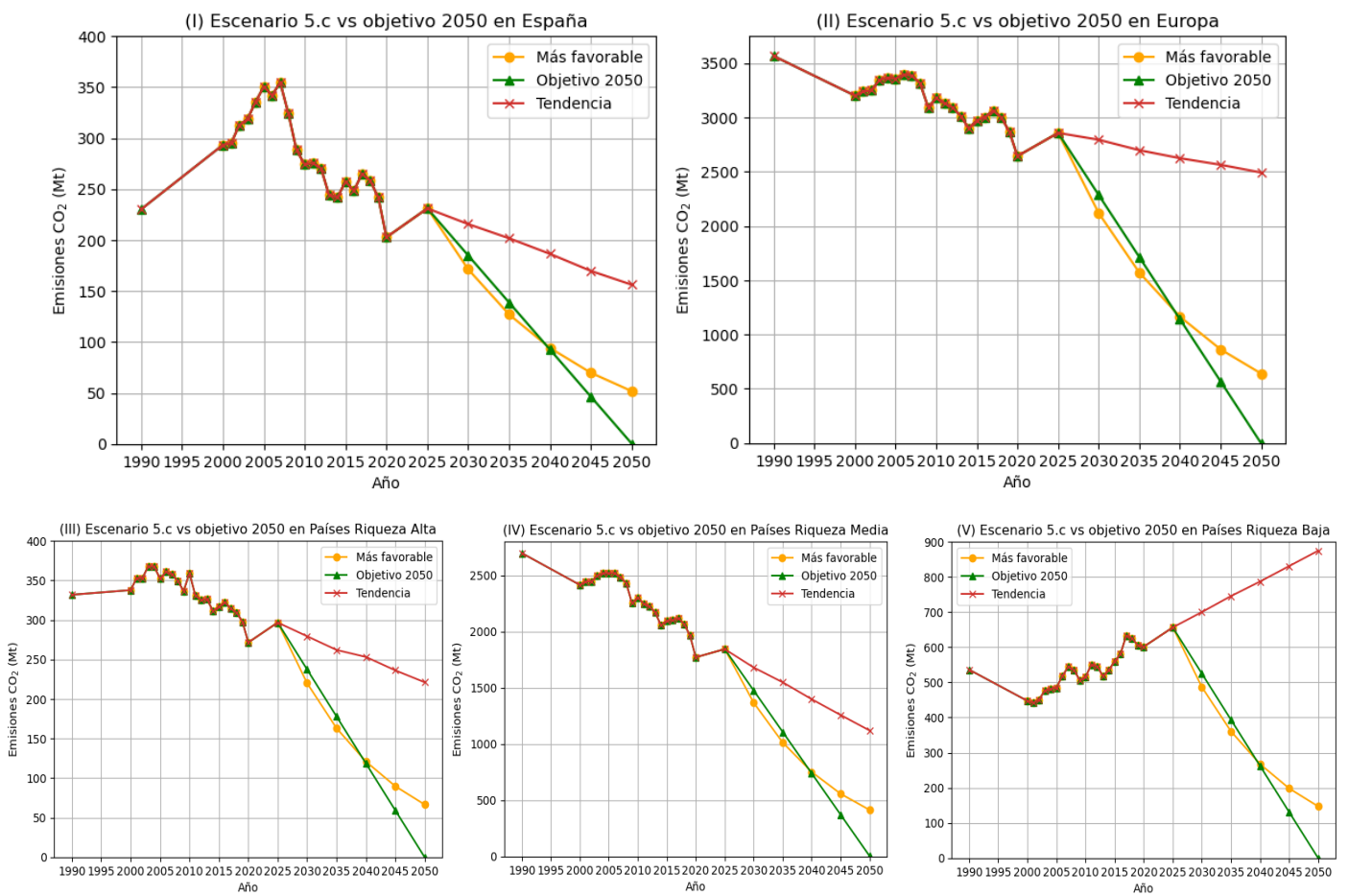


Figura 19. Gráficas de evolución de emisiones de CO₂ siguiendo el escenario 5.c. correspondiente al objetivo de la UE de 2050 (Elaboración propia).

De acuerdo con el análisis planteado, en ninguno de los casos el escenario más optimista logra cumplir los objetivos establecidos para los años 2030, 2040 y 2050. Considerando la totalidad de países analizados de Europa, aproximadamente se alcanzaría una reducción del 41 % en 2030 y del 82 % en el año 2050, por lo que no se podría conseguir la neutralidad climática únicamente con las variaciones de los factores de Kaya establecidas. En España, se puede observar que resulta más complicado cumplir los objetivos tomando como referencia el año 1990, puesto que en este año no se había alcanzado el pico de emisiones del país correspondiente a los años 2005-2007.

En cuanto a nivel de desarrollo, los países de riqueza alta, pese a sus mayores recursos tecnológicos y estructura energética más avanzada, muestran un nivel de reducción de emisiones inferior a los clasificados como riqueza media. Esto es debido fundamentalmente a que, aunque se aplica el mismo decrecimiento económico anual a ambos grupos, los países de mayor riqueza parten de un PIB per cápita más elevado.

Por otro lado, los países de riqueza baja todavía se encuentran en fase de expansión económica, priorizando el desarrollo industrial y el acceso a la energía, lo que lleva a un menor ritmo de reducción de emisiones aplicando las mismas medidas.

Desde un punto de vista más equitativo de cara a alcanzar el objetivo de reducción de emisiones de CO₂ en 2050, lo lógico sería permitir a los países de riqueza baja mantener un crecimiento económico sostenido mientras mejoran su intensidad energética y de carbono. En cambio, los países de riqueza alta y media, que ya poseen valores reducidos de estos factores, deberán experimentar un decrecimiento económico controlado para poder alcanzar reducciones considerables en las emisiones. Como ejemplo de escenario aplicando estos criterios, se propone una variación del escenario 5.c. (5.2.c), donde se aplican las variaciones de los factores de Kaya recogidos en la tabla 18 y se muestran los resultados en la figura 20.

Tabla 18. Variación anual y total de emisiones de CO₂ en el escenario 5.2.c (Elaboración propia).

	Variación anual media por factor Kaya (2025-2050)				Variación total en 2050 respecto a 1990	
	Población	PIB per cápita	IE	IC	Caso más favorable	Tendencia actual
<i>Riqueza Alta</i>	-1,00%	-1,00%	-1,00%	-2,00%	-76%	-33%
<i>Riqueza Media</i>	-1,00%	-0,50%	-2,00%	-2,50%	-84%	-58%
<i>Riqueza Baja</i>	-1,00%	1,00%	-3,00%	-5,00%	-84%	63%

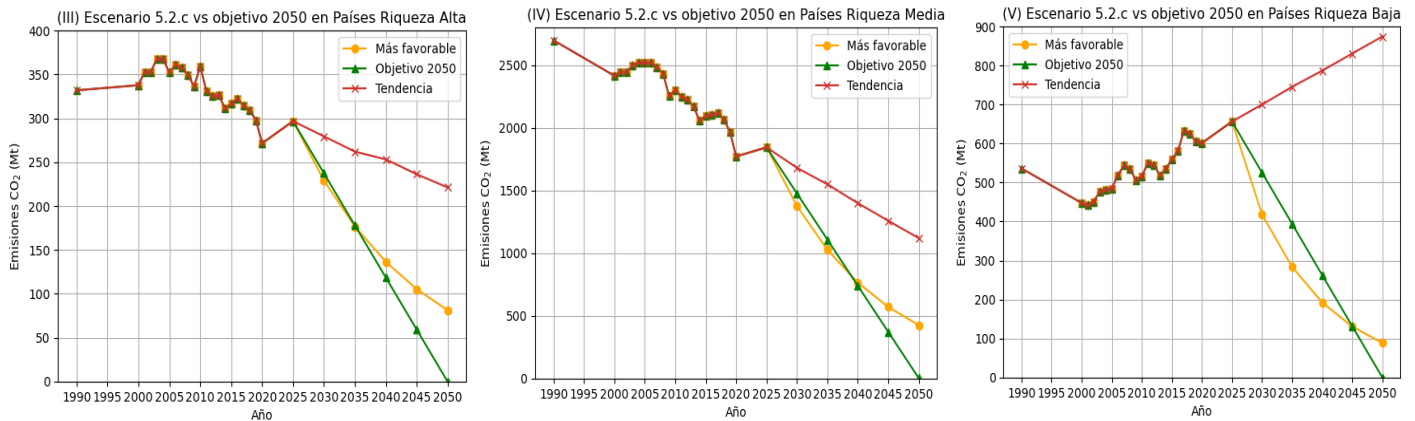


Figura 20. Gráficas de evolución de emisiones de CO₂ siguiendo el escenario 5.2.c. correspondiente al objetivo de la UE de 2050 (Elaboración propia).

Tal y como se muestra en el escenario 5.2.c, los países clasificados como riqueza baja alcanzan en el año 2050 más de un 10 % más de reducción de emisiones de CO₂ respecto al escenario 5.c mediante el mantenimiento de un crecimiento económico positivo y aplicando mayores reducciones en intensidad de energía y de carbono. Esto demuestra que es factible permitir el desarrollo de la economía de este grupo de países si a la par mejoran la eficiencia de sus infraestructuras energéticas y optan por la generación de energía renovable. Por otro lado, para los países de mayor nivel de desarrollo económico este escenario resulta ligeramente menos optimista que el 5.c. debido a las mayores restricciones de reducción en la intensidad de energía y carbono aplicadas.

Con todo ello, se puede concluir que es inviable alcanzar las metas establecidas por la Unión Europea de reducción de emisiones sin recurrir a medidas de eliminación de CO₂ atmosférico, tales como las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂. En el caso más optimista, se alcanzaría el escenario de emisiones bajas SSP1-2.6 planteado por el IPCC (2023), que se traduce en un incremento de la temperatura de casi 2 °C en el año 2100.

3.2.6. Implementación de Captura y Almacenamiento de CO₂

De acuerdo con el último informe AR6 del IPCC (2023), para prácticamente todos los escenarios futuros evaluados es necesario absorber CO₂ de la atmósfera para alcanzar emisiones netas iguales a cero o incluso emisiones negativas. Esto es debido a fuentes industriales de emisión de CO₂ complejas de eliminar, como es el caso de las generadas

en la industria cementera o siderúrgica. La eliminación del CO₂ atmosférico puede llevarse a cabo mediante las siguientes medidas: reforestación y forestación, biochar, y tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂.

La captura y almacenamiento de CO₂ es una tecnología diseñada para retirar dióxido de carbono directamente del aire o de la biomasa y almacenarlo en reservas geológicas subterráneas. La capacidad de almacenamiento geológico del planeta se estima en alrededor de 1000 Gt CO₂, suficiente para limitar el calentamiento global a 1,5 °C en el año 2100, aunque la distribución regional de zonas de almacenaje potenciales podría ser un factor limitante. La Comisión Europea actualmente financia múltiples proyectos y programas para el desarrollo e investigación de esta tecnología. Además, en 2024 se publicó el primer reglamento de la UE (2024/3012) de carácter voluntario para la certificación de absorciones permanentes y almacenamiento de carbono (Comisión Europea, 2024).

Partiendo del escenario planteado 5.c, correspondiente al objetivo europeo de neutralidad climática de 2050, se pueden cuantificar las emisiones de CO₂ que sería necesario capturar ese año para cumplir la meta establecida (tabla 19).

Tabla 19. Resultado de las emisiones de CO₂ a capturar en el año 2050 (Elaboración propia).

Mínimo de emisiones a capturar en 2050 (Mt)	
<i>España</i>	52
<i>Europa</i>	640
<i>Riqueza Alta</i>	67
<i>Riqueza Media</i>	413
<i>Riqueza Baja</i>	147

Para el total de países muestreados, habría que absorber y almacenar al menos 640 Mt de CO₂ para compensar la estimación de emisiones del año 2050, de las cuales a España corresponderían 52 Mt. De acuerdo con la organización “Clean Air Task Force” (CATF, 2023), en Europa se estima que la capacidad potencial de almacenaje de CO₂ de Europa se encuentra entre 262 y 1520 Gt distribuidos en 17 países (figura 21), lo que permitiría almacenar al menos aproximadamente 400 años de emisiones del total de los países muestreados. Noruega y Bulgaria son los países que, teóricamente, poseen mayores capacidades, mientras que en Finlandia y Estonia no se han encontrado cuencas sedimentarias adecuadas para ello. En España, la capacidad se estima en torno a 13-43 Gt, pudiendo almacenar las emisiones de al menos 250 años.

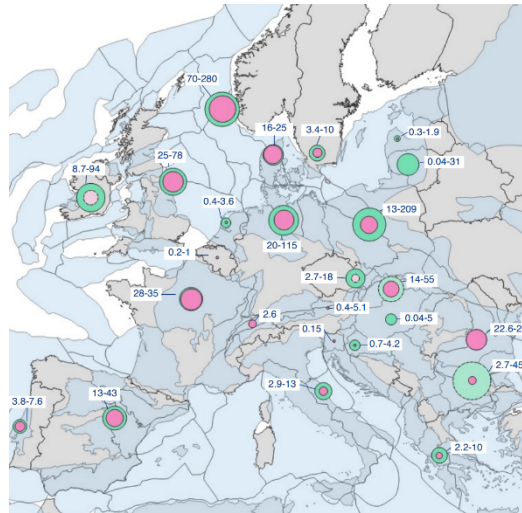


Figura 21. Mapa de distribución de la capacidad teórica de almacenamiento de CO₂ en Europa (CATF, 2023).

No obstante, la capacidad operacional real será probablemente inferior a la teórica debido a diversos motivos técnicos, socioeconómicos y legales. En el futuro, conforme avance el desarrollo de la tecnología de captura y almacenamiento de CO₂, se conocerá con mayor exactitud el potencial de almacenaje de cada país.

4. Conclusiones

El presente Trabajo Fin de Máster ha permitido verificar la validez de la identidad de Kaya como herramienta de estimación de emisiones de CO₂ y aplicarla para el planteamiento de escenarios futuros de descarbonización en el contexto europeo. A partir del análisis de 19 países de Europa y del estudio individual y combinado de los cuatro factores de Kaya (población, PIB per cápita, intensidad energética e intensidad de carbono), se han obtenido las siguientes conclusiones:

- 1) La expresión matemática de la identidad de Kaya ha demostrado ser una herramienta válida para el cálculo de las emisiones de CO₂ tanto a nivel nacional como sobre la agregación total de los países muestreados. La comparación entre los valores registrados en el Banco Mundial de Datos frente a los calculados mediante la ecuación ha mostrado una desviación inferior a la incertidumbre máxima establecida del 9,45 % para el conjunto del muestreo y para todos los años analizados. Esto confirma que la ecuación de Kaya es fiable y suficientemente precisa para su uso en proyecciones futuras de emisiones de CO₂.
- 2) Se han desarrollado múltiples escenarios futuros hasta el año 2050 a partir de la extrapolación de las tendencias históricas de cada factor de Kaya, siguiendo un enfoque “bottom-up”. Este análisis ha permitido estudiar el impacto individual de cada uno, así como identificar combinaciones óptimas que permitan avanzar hacia los objetivos climáticos europeos. En los escenarios planteados, la intensidad de carbono y el PIB per cápita son los parámetros que muestran una mayor influencia sobre la variación del total de emisiones, asociados a la expansión de las energías renovables y al crecimiento económico. Por otro lado, la intensidad energética tiene un impacto menor debido a la estrecha relación existente entre el consumo energético y la actividad económica, donde las reducciones se producen más lentamente mientras se mejora la eficiencia energética. Finalmente, la población es el factor con menor repercusión debido a su tendencia a la estabilidad y la complejidad de su control.
- 3) La clasificación de países por nivel de riqueza ha permitido observar que los países con menor PIB per cápita disponen de margen para crecer económicamente mientras reducen sus emisiones, siempre que apliquen medidas de mejora en eficiencia

energética y descarbonización. Por otro lado, los países de rentas altas ya han alcanzado importantes reducciones en intensidad energética e intensidad de carbono, por lo que cada vez resulta más complicado mantener la tendencia descendiente. Por lo tanto, deben plantearse experimentar un decrecimiento económico sostenido para alcanzar reducciones importantes en las emisiones.

- 4) Los objetivos europeos de reducción de emisiones de los años 2030 y 2040, y de neutralidad climática en el año 2050, no se consiguen alcanzar mediante los escenarios planteados sin la implementación de medidas de captura y almacenamiento de CO₂. Esto refuerza lo que afirma el informe AR6 del IPCC (2023) respecto a la necesidad de implementar este tipo de tecnologías, especialmente en sectores industriales difíciles de descarbonizar. Europa posee una capacidad teórica de almacenamiento de CO₂ suficiente para los próximos 400 años de emisiones del total de países muestreados. Conforme se avance en la investigación y desarrollo de este campo, se conocerá con mayor exactitud su potencial.
- 5) La estructura de la metodología empleada en este Trabajo Fin de Máster es replicable y adaptable, y permite integrarse en otros marcos de análisis, como los escenarios SSP del IPCC, ofreciendo una base sólida para estudios comparativos y como apoyo en el desarrollo de políticas energéticas y climáticas.

5. Bibliografía

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) & Oficina Española de Cambio Climático (OECC) (2021). *Cambio climático: Bases físicas. Guía resumida del Sexto Informe de Evaluación del IPCC. Grupo de Trabajo I.* Gobierno de España. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/ceneam/recursos/mini-portales-tematicos/ipcc-guia-resumida-gt1-bases-fisicas-ar6_tcm30-533081.pdf

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) & Oficina Española de Cambio Climático (OECC) (2023). *Cambio climático: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Guía resumida del Sexto Informe de Evaluación del IPCC. Grupo de Trabajo II.* Gobierno de España. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/ipcc-guia-resumida-gt2-imp-adap-vuln-ar6_tcm30-548667.pdf

Ang, B. W. (2015). LMDI decomposition approach: A guide for implementation. *Energy Policy*, 86, 233–238. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.06.007>

Banco Mundial de Datos (2024). *World Development Indicators*. <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>

Bevington, P. R. (2003). *Data reduction and error analysis for the physical sciences* (3rd ed.). McGraw-Hill.

Bigerna, S., & Polinori, P. (2022). Convergence of KAYA components in the European Union toward the 2050 decarbonization target. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132950. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132950>

Clean Air Task Force. (2023). *Unlocking Europe's CO₂ Storage Potential: An Analysis of Optimal CO₂ Storage in Europe*. <https://www.catf.us/resource/unlocking-europes-co2-storage-potential-analysis-optimal-co2-storage-europe/>

Comisión Europea (2019). *The European Green Deal* (COM(2019) 640 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>

Consejo Europeo (2024). *Objetivo 55*. <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/fit-for-55/>

Comisión Europea (2024). *Carbon removals and carbon farming*. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-removals-and-carbon-farming_en#carbon-removals-and-carbon-farming-in-a-nutshell

Comisión Europea (2024). *Energy efficiency targets, directive and rules*. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-targets_en?prefLang=es

Comisión Europea (2024). *Renewable energy targets, directive and rules*. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-targets_en?prefLang=es

Gavenas, E., Rosendahl, K. E., & Skjerpen, T. (2015). CO₂-emissions from Norwegian oil and gas extraction. *Statistics Norway, Research Department*, No. 806.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2024). *La Unión Europea y el cambio climático*. Gobierno de España. <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/la-union-europea.html#el-marco-2030-de-energia-y-clima-y-el-objetivo-55-fit-for-55>

Parrique, T. (2022). *Degrowth in the IPCC AR6 WGII*. <https://timotheeparrique.com/degrowth-in-the-ipcc-ar6-wgii/>

Institución Oceanográfica de la Universidad de California (2024). *The Keeling Curve*. UC San Diego. <https://keelingcurve.ucsd.edu/>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Sixth assessment report (AR6)* (Vols. 1–3). IPCC. <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>

Our World In Data. (2024). *Annual CO₂ emissions per country*. <https://ourworldindata.org/grapher/annual-co2-emissions-per-country>

Servicio Europeo de Acción Exterior. (2020). *La demografía y Europa en el mundo*. https://www.eeas.europa.eu/eeas/la-demograf%C3%ADa-y-europa-en-el-mundo_es

Štreimikienė, D., & Baležentis, T. (2015). Kaya identity for analysis of the main drivers of GHG emissions and feasibility to implement EU “20–20–20” targets in the Baltic States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1348–1362. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.060>

Wawrzyniak, D. (2020). CO₂ emissions in the Visegrad Group countries and the European Union climate policy. *Comparative Economic Research. Central and Eastern Europe*, 23(1), 91–107. <https://doi.org/10.18778/1508-2008.23.05>

World Resources Institute (WRI), & World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). (2015). *The greenhouse gas protocol: A corporate accounting and reporting standard* (Revised edition). World Resources Institute.