

EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR SECTORES ECONÓMICOS: ¿QUÉ SECTORES ESTÁN ADAPTANDO MEJOR SU INTENSIDAD ENERGÉTICA?

Jesús Rodríguez-López

Universidad Pablo de Olavide e Ivie

Gustavo A. Marrero-Díaz

Universidad de La Laguna y CEDESOG

Andrés Lorente-de-las-Casas

Universidad de La Laguna, CEDESOG e Instituto Universitario de la Empresa

Resumen

Para cumplir con el objetivo de reducción del 55 por 100 de gases de efecto invernadero (GEI) en 2030, las emisiones netas en España aún deberían disminuir un 43 por 100 adicional. En este trabajo se analiza la evolución del flujo neto de emisiones entre 1990 y 2023 y los factores que lo han condicionado: la intensidad energética, la intensidad del carbono y la actividad económica. Nuestras conclusiones son las siguientes. Primero, desde 2005 se ha producido una continua reducción de las emisiones, como consecuencia de (i) la moderación en la intensidad energética, (ii) la desaceleración económica entre 2008 y 2014; y (iii) el efecto composición que supone que el valor añadido bruto (VAB) del sector servicios haya ido aumentando hasta más del 70 por 100 del total, y, sin embargo, sus emisiones solo representan el 3 por 100 del total emitido. Segundo, el sector de transportes constituye un importante escollo en la consecución de estos objetivos: pese a que su intensidad energética se ha reducido, la intensidad del carbono se ha mantenido plana a lo largo de las tres décadas analizadas, indicando una falta de alternativas en sus fuentes energéticas. El diseño de las políticas energéticas y de medioambiente y las medidas fiscales que intenten moderar las cifras de estas emisiones, deberían atender este aspecto.

Palabras clave: CO₂, emisiones de GEI, intensidad energética, intensidad del carbono.

Abstract

To meet the target of reducing greenhouse gas (GHG) emissions by 55% by 2030, net emissions in Spain would still need to decrease by an additional 43%. This paper analyzes the evolution of net emissions flow between 1990 and 2023 and the factors that have influenced it: energy intensity, carbon intensity, and economic activity. Eventually, we conclude the following. First, since 2005 there has been a continuous reduction in emissions, as a consequence of (i) the moderation in energy intensity, (ii) the economic slowdown between 2008 and 2014, and (iii) the composition effect, whereby the gross value added (GVA) of the services sector has increased to over 70% of the total, while its emissions account only for 3% for total emissions. Second, the transport sector presents a significant obstacle to achieving these objectives: although its energy intensity has decreased, its carbon intensity has remained flat over the three decades analyzed, indicating a lack of alternative energy sources. Energy and environmental policies, as well as fiscal measures aimed at reducing these emissions, should address this issue.

Keywords: CO₂, GHG emissions, energy intensity, carbon intensity.

JEL classification: C23, E13, H22, Q20, Q43, Q54, R40.

I. INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por el cambio climático ha generado la necesidad de un proceso de transición energética que sustituya progresivamente el uso de combustibles fósiles por fuentes limpias y renovables. Para cumplir los objetivos del Acuerdo de París de 2015 (1), las

emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI) deben reducirse de forma sustancial con el fin de alcanzar la neutralidad climática a mediados de siglo (IPCC, 2018; ONU, 2015).

El cambio climático se ha convertido en uno de los principales desafíos políticos de la actualidad y de las próximas décadas. La capacidad de

reducir y controlar las emisiones de GEI tiene implicaciones cruciales sobre el medioambiente y el bienestar de los ciudadanos (Stern, 2007). Además, los efectos de estos gases se extienden más allá del flujo emitido hacia la concentración acumulada en la atmósfera. El elevado tiempo de residencia de una parte de los GEI hace de esta cuestión un problema de largo plazo, que excede la gestión de fluctuaciones puntuales en las emisiones (IPCC, 2021). Todo ello requiere políticas y esfuerzos globales que impliquen a la mayor parte de los países del planeta.

En este trabajo analizamos la evolución del flujo de GEI en España desde 1990 hasta 2023 y evaluamos su trayectoria y el grado de cumplimiento de los objetivos establecidos. El objetivo general, recogido en la Ley Europea del Clima, fija como meta legalmente vinculante alcanzar las cero emisiones netas de GEI en 2050, estableciendo, además, un objetivo intermedio de reducción de al menos el 55 por 100 para 2030 respecto a los niveles de 1990 (Comisión Europea, 2021). Como veremos, los últimos datos disponibles indican que aún queda distancia para alcanzar estos objetivos, si bien desde mediados de la década de 2000 se aprecia una reducción significativa en las emisiones.

Con este propósito, utilizando la identidad de Kaya (Kaya y Yokoburi, 1997), realizamos una descomposición del flujo de emisiones entre tres factores: la intensidad del carbono, la intensidad energética y el valor añadido bruto per cápita. Esta factorización se aplica tanto al agregado de la economía como a un conjunto de seis sectores productivos y a los hogares. La desagregación sectorial permite, por una parte, identificar a los tres principales emisores de GEI en España —la industria, el sector de la energía y los servicios de transporte— que actualmente concentran en torno al 92 por 100 de las emisiones. Por otra parte, permite cuantificar el papel de los tres factores mencionados en la evolución de dichas emisiones.

La intensidad del carbono mide el volumen de GEI emitido por unidad de insumo energético utilizada en una economía. Una reducción de esta intensidad puede estar asociada a una reducción de las emisiones a partir de un cambio en las

fuentes de producción energética (energías renovables o plantas nucleares). Por su parte, la intensidad energética indica el volumen energético empleado por unidad de producto final. La reducción de la intensidad energética está asociada con una mejora en la eficiencia productiva (véase Díaz *et al.*, 2019, como indicamos más adelante). Entre los países se observa una correlación negativa entre la intensidad energética y el crecimiento económico: períodos donde se producen caídas de la intensidad energética están asociados con mejoras de productividad. Finalmente, el valor añadido bruto (VAB) per cápita recoge los efectos que tienen sobre las emisiones la actividad económica en su conjunto, tanto por parte de los hogares como por los distintos sectores productivos. Es importante resaltar que la descomposición de Kaya se basa en una identidad, no en una ecuación de comportamiento. Así pues, pese a que es útil para identificar las fuentes de emisiones, no se puede utilizar esta descomposición como inferencia causal.

Nuestros principales resultados son los siguientes. *Primero*, los últimos datos disponibles (2020-2023) indican que España está algo lejos de cumplir los objetivos de reducción de emisiones netas trazados por la Ley Europea del Clima. Para 2023, las emisiones netas son un 12,5 por 100 menores respecto a 1990. Por tanto, a fin de lograr el objetivo del 55 por 100 para 2030, apenas un lustro, restarían algo más de 42 puntos de esfuerzo adicional. En otras palabras, habría que conseguir una reducción de las emisiones netas de 8,5 puntos porcentuales por año, entre 2026 y 2030.

Segundo, la descomposición realizada indica que la actividad económica ha gobernado el flujo de emisiones de GEI a largo plazo en España. Ahora bien, desde 2005, se ha producido una importante caída en las emisiones netas que estaría explicada por dos factores. El primero es la moderación, tanto de la intensidad energética (principalmente), junto con una modesta reducción de la intensidad del carbono. El segundo elemento que explica esta caída es el efecto composición en la producción de bienes y servicios experimentado por la economía española: el aumento en el peso de los servicios, excluyendo el sector de transportes, desde un 58 por 100 a principios de los noventa hasta un

70,5 por 100 en 2020 (el transporte añadiría un 4,5 por 100 al valor). Las emisiones brutas de los servicios tan solo suponen el 3,5 por 100 del total (el transporte emite el 45,5 por 100 del total bruto). En resumen, desde 2005, en España se emite menos por una mejora en la eficiencia energética, por una moderada mejoría en la manera en la que producimos energía, y porque cada vez más nos dedicamos a actividades que emiten poco.

Tercero, la principal fuente de este problema está en el sector del transporte. Como veremos, también se ha observado una caída en las emisiones del transporte desde 2005, pero debido a mejoras en la intensidad energética. La intensidad del carbono presenta un comportamiento plano en este sector, indicando que hay poco margen de sustitución de fuentes energéticas. Por ejemplo, como discutimos más adelante, los efectos de la “dieselización” del parque de vehículos en España desde 1990 han sido muy controvertidos, y los análisis realizados indicarían efectos indeseados sobre las emisiones. Los efectos de la “electrificación” del parque pueden que sean positivos, pero aún no se dejan ver de forma clara sobre los datos. Otra posible causa es el aumento del peso relativo de los vehículos SUV (*sport utility vehicle*) en la matriculación de vehículos en España que, aunque tienen etiqueta ECO, tienen mayores consumos medios de combustible en los tramos de conducción donde funcionan con motor térmico que vehículos de otra categoría (véase Ramírez-Díaz *et al.*, 2022).

Finalmente, como concluiremos en este trabajo, el verdadero margen de reducción de emisiones que aún queda por consolidar es el de la intensidad del carbono. Como hemos indicado, en los sectores productivos, la reducción es moderada y, en ocasiones, tiene vaivenes erráticos. En los hogares, sin embargo, se observa una mejora en la intensidad del carbono. Pero lo cierto es que los hogares contribuyen poco al total emitido. La regulación energética, que proporciona incentivos a cómo y cuánta energía producir, juega un papel decisivo en este sentido (por ejemplo, ayudas a instalaciones fotovoltaicas para el autoconsumo, subsidios a la compra de vehículos eléctricos u otros electrodomésticos, ayudas para el arreglo de fachadas, bonos para el transporte público, etc.).

El trabajo se estructura en cinco secciones. La siguiente sección presenta un sumario de los principales objetivos sectoriales de emisiones de GEI y de algunas medidas adoptadas hasta el momento. En la tercera sección analizamos el estado de la cuestión y los datos empleados. A continuación, describimos la metodología de descomposición de Kaya y la aplicamos al nivel agregado, sectorial y a los hogares. Finalmente, la quinta sección recoge las conclusiones.

II. OBJETIVOS SECTORIALES DE EMISIONES DE GEI Y MEDIDAS ADOPTADAS

La política climática de la Unión Europea (UE) se articula en torno a un marco jurídico ambicioso y vinculante que consolida sus objetivos de neutralidad climática para 2050, en línea con el compromiso adquirido en el Acuerdo de París de 2015. Este marco quedó establecido con la aprobación de la Ley Europea del Clima (Reglamento (UE) 2021/1119), que fija como meta legalmente obligatoria alcanzar las cero emisiones netas de gases de efecto invernadero (GEI) para 2050. Como objetivo intermedio, el reglamento prevé una reducción de al menos el 55 por 100 de las emisiones netas en 2030 respecto a 1990.

Las emisiones brutas de GEI incluyen los flujos totales emitidos de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), expresados en kilotoneladas equivalentes de CO₂. El vapor de agua, aunque es el principal GEI natural, no se incluye en este cálculo. Por su parte, las emisiones netas se definen como la diferencia entre las emisiones brutas y la captación de GEI asociada al uso del suelo, los cambios de uso del suelo y la silvicultura (LULUCF, por sus siglas en inglés).

A este marco regulatorio se suma la reciente propuesta de la Comisión Europea (COM [2024] 63, febrero de 2024), que plantea un nuevo objetivo intermedio: reducir un 90 por 100 las emisiones netas para 2040. La propuesta incorpora además la creación de un Presupuesto Climático indicativo para el período 2030-2050. Esta iniciativa se fundamenta en el dictamen del Consejo Científico Asesor Europeo sobre Cambio Climático

(2023), que recomienda acelerar las reducciones antes de 2040, y en un refuerzo del marco de gobernanza del uso del suelo bajo el Reglamento LULUCF (Reglamento [UE] 2023/839).

El conjunto de medidas legislativas conocido como “Objetivo 55” (*Fit for 55*) adapta la legislación climática y energética de la UE para cumplir los objetivos de 2030. Entre las principales reformas destacan: a) la revisión del Régimen de Comercio de Derechos de Emisión (ETS); b) la creación del EU ETS2 para edificios y transporte; c) el Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono (CBAM); d) la Directiva de Energías Renovables (objetivo mínimo del 42,5 por 100 en 2030); e) la Directiva de Eficiencia Energética; f) la reforma del reglamento LULUCF; g) nuevas exigencias para la aviación, el transporte marítimo y la infraestructura de recarga; h) la creación del Fondo Social para el Clima, destinado a apoyar a los hogares vulnerables en esta transición.

En este contexto geopolítico y energético, el Plan REPowerEU, presentado en mayo de 2022 (COM [2022] 230 final), refuerza el marco del Pacto Verde Europeo y del paquete “Objetivo 55”. REPowerEU surge como respuesta estratégica a la invasión rusa de Ucrania y a la necesidad urgente de reducir la dependencia energética respecto a los combustibles fósiles rusos. El plan se articula en torno a cuatro pilares: 1) ahorro energético inmediato y estructural; 2) diversificación de suministros; 3) sustitución acelerada de combustibles fósiles por fuentes renovables; y 4) coordinación de inversiones y reformas.

Entre las medidas más relevantes destacan el aumento de los objetivos de eficiencia energética (hasta un 13 por 100 adicional), el incremento del objetivo de energías renovables (hasta el 45 por 100 del consumo bruto final en 2030), el despliegue masivo de energía solar (320 GW en 2025 y 600 GW en 2030), la producción e importación de 20 millones de toneladas de hidrógeno renovable para 2030 y el impulso al biometano y a las bombas de calor. Asimismo, se proponen reformas para acelerar permisos, instrumentos financieros específicos y mayor flexibilidad en la asignación de fondos. En total, REPowerEU aspira a reducir más de 100.000

millones de m³ anuales de demanda de gas ruso mediante una combinación de eficiencia, electrificación y renovables.

En julio de 2022, la Comisión Europea aprobó el Reglamento Delegado (UE) 2022/1214, que incorpora determinadas actividades relacionadas con el gas fósil y la energía nuclear como “transitorias” dentro de la taxonomía europea de actividades sostenibles, siempre que cumplan criterios técnicos estrictos. La medida generó una notable controversia y fue objeto de críticas por parte de varios Estados miembros, entre ellos España, Dinamarca, Austria y Luxemburgo.

España ha adaptado este marco mediante dos documentos estratégicos: la Estrategia a Largo Plazo para una Economía Española Moderna, Competitiva y Climáticamente Neutra en 2050 (ELP 2050) y el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2023–2030 (PNIEC). La ELP 2050 establece la neutralidad climática como objetivo nacional para 2050, con una descarbonización del 90–100 por 100 en los sectores clave. El PNIEC, por su parte, contempla una reducción del 32 por 100 de las emisiones de GEI para 2030 respecto a 1990, así como metas de energías renovables, eficiencia energética y electrificación que contribuyen al cumplimiento de los objetivos europeos.

Ambos documentos recogen medidas sectoriales específicas: a) despliegue masivo de energías renovables; b) electrificación del transporte; c) rehabilitación energética de edificios; d) descarbonización industrial; e) impulso al biogás y al hidrógeno renovable; y f) refuerzo de los sumideros naturales de carbono. Estas estrategias permiten una alineación efectiva entre la ambición europea y la acción climática nacional.

En el cuadro n.º 1 se presenta una visión integrada de los objetivos de descarbonización por sectores clave en la normativa europea y española. La clasificación empleada atiende a los usuarios finales de energía como fuentes emisoras, por lo que no coincide con la clasificación de actividades económicas (NACE Rev. 2/ISIC Rev. 4) ni con el Sistema Europeo de Cuentas (ESA 2010). A continuación, se describen los principales objetivos por sectores.

CUADRO N.º 1

ALINEACIÓN DE LOS OBJETIVOS DE DESCARBONIZACIÓN EUROPEOS Y ESPAÑOLES

SECTOR (FUENTES DE EMISIÓN)	OBJETIVOS UE	OBJETIVOS ELP 2050	OBJETIVOS PNIEC 2023-2030
Energía (generación de energía eléctrica)	Reducción de emisiones ETS; 100 % ingresos climáticos; electrificación acelerada; 42,5 %-45 % renovables en 2030.	100 % electricidad renovable; electrificación >80 %; 250 GW renovables instalados.	81 % electricidad renovable; 160 GW renovables; 22,5 GW almacenamiento.
Transporte (turismos y vehículos industriales)	-55 % CO ₂ en coches y -50 % en furgonetas (2030); vehículos nuevos cero emisiones (2035); inclusión en ETS.	Reducción del 98 % de emisiones respecto a 1990; 100 % ventas de vehículos cero emisiones en 2040.	5,5 millones VE; +27 % modal urbano sostenible; refuerzo ferroviario.
Industria	Extensión del ETS; CBAM (ajuste de carbono en frontera); refuerzo innovación y eficiencia energética.	Reducción del 90 % emisiones; electrificación; hidrógeno y eficiencia industrial.	11.600 M€ inversión; electrificación; hidrógeno verde (11 GW).
Edificación (residencial y terciario)	Ahorro energético +11,7 %; mínimo 49 % de renovables; renovación anual 3 % edificios públicos.	Reducción del 85 % (residencial) y 87 % (terciario); edificios NZEB; ahorro 50 %.	1,37 millones de viviendas rehabilitadas; 3,5 GW autoconsumo; bombas de calor.
Agropecuario y uso del suelo	310 MtCO ₂ eq sumidero neto en 2030; restauración de bosques y suelos; plantación de 3.000 millones de árboles.	Reducción del 58 % emisiones (base 1990); mejora agrícola; aumento secuestro de carbono.	Reducción fertilizantes y purines; 20,4 TWh biogás; secuestro mejorado.
Residuos	Extensión economía circular; reducción vertido residuos biodegradables; uso de biogás.	Reducción del 50 % emisiones; reciclaje; reducción 80 % vertido residuos biodegradables.	Reducción residuos biodegradables; impulso economía circular.
Gases fluorados	Eliminación progresiva de HFC; control y recuperación de emisiones industriales.	Reducción del 85 % emisiones respecto a 1990; tecnologías sustitutivas de HFC.	Regulación y control gases; sustitución progresiva; medidas preventivas.

Nota: Estrategia a Largo Plazo para una Economía Española Moderna, Competitiva y Climáticamente Neutra en 2050 (ELP, 2050); Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2023-2030 (PNIEC). Las emisiones del sector residencial se refieren exclusivamente a la combustión en los hogares (gas, gasóleo, biomasa, etc.). No incluyen las emisiones derivadas del consumo de electricidad (atribuidas al sector energético), ni al uso de combustibles para transporte (asignado al sector transporte). Según la clasificación del IPCC, el sector residencial se corresponde con la categoría 1A4a, mientras que el sector "Comercial y público" se corresponde con 1A4b. Ambos forman el agregado "Edificación" en los objetivos del PNIEC y la ELP.

Energía. La UE prevé una transformación completa del sistema eléctrico basada en energías renovables. El paquete "Objetivo 55" establece un objetivo del 42,5 por 100 de renovables en el consumo final para 2030 (con un 45 por 100 indicativo). El ETS se refuerza mediante una reducción más rápida del techo de emisiones y la inclusión de nuevos sectores. La ELP 2050 proyecta un sistema eléctrico 100 por 100 renovable con más de 250 GW instalados y una electrificación superior al

80 por 100 de los usos finales. El PNIEC fija para 2030 un 81 por 100 de generación renovable, 160 GW de potencia renovable y 22,5 GW de almacenamiento.

Transporte. El transporte es uno de los principales focos de emisiones (véase el apartado 1 de la sección IV). La UE exige para 2030 una reducción del 55 por 100 en turismos y 50 por 100 en furgonetas nuevas, con el objetivo de que todos los vehículos nuevos sean de cero emisiones en 2035.

El transporte por carretera se incorpora al nuevo EU ETS2. La ELP 2050 prevé una reducción del 98 por 100 de las emisiones, con ventas de vehículos ligeros 100 por 100 de cero emisiones en 2040. También prevé un incremento del 40 por 100 en el transporte ferroviario de alta velocidad y del 60 por 100 en transporte público. El PNIEC concreta que habrá 5,5 millones de vehículos eléctricos en circulación en 2030, con un incremento del 27 por 100 en el transporte urbano sostenible, y una fuerte inversión en la electrificación del ferrocarril y modos limpios.

Industria. La UE refuerza el ETS industrial e introduce el mecanismo de ajuste en frontera de carbono (CBAM en sus siglas en inglés) para evitar fugas de carbono. Se promueve la eficiencia energética y el hidrógeno renovable. También impulsa la eficiencia energética y el uso de hidrógeno renovable. La ELP 2050 exige una reducción del 90 por 100 de las emisiones industriales mediante electrificación, sustitución de combustibles fósiles, digitalización y uso de hidrógeno. El PNIEC incluye una inversión pública-privada de 11.600 millones para descarbonización industrial, con objetivos concretos de electrificación, eficiencia e instalación de 11 GW de hidrógeno renovable.

Edificación (residencial y terciario). Los edificios consumen un 40 por 100 de la energía y generan el 36 por 100 de las emisiones relacionadas con el uso de energía en la UE. El objetivo europeo es reducir el consumo energético un 11,7 por 100 para 2030 y que el 49 por 100 de la energía utilizada en edificios provenga de renovables, renovando además el 3 por 100 de la superficie de edificios públicos cada año. La ELP 2050 plantea una reducción del 85 por 100 de las emisiones en edificios residenciales y del 87 por 100 en terciarios, con una mejora del 50 por 100 en eficiencia energética y el cumplimiento generalizado del estándar NZEB (edificio de consumo casi nulo). El PNIEC prevé la rehabilitación energética de 1,37 millones de viviendas, la instalación de 3,5 GW de autoconsumo residencial y el despliegue de bombas de calor para climatización limpia.

Agropecuaria y uso del suelo (LULUCF). La agricultura y el uso del suelo son fundamentales para el secuestro de carbono. La UE establece un objetivo de sumidero neto de 310 MtCO₂eq para 2030,

mediante restauración de suelos, humedales y reforestación (incluyendo la plantación de 3.000 millones de árboles). La ELP 2050 fija una reducción del 58 por 100 de las emisiones agropecuarias respecto a 1990, con un fuerte impulso a la sostenibilidad ganadera y al aumento del secuestro en suelos agrícolas. El PNIEC incluye medidas para reducir el uso de fertilizantes y purines, fomentar el biogás (20,4 TWh) y mejorar el manejo del carbono en los suelos agrícolas.

Residuos. La UE promueve una reducción de residuos biodegradables en vertederos, con refuerzo de la economía circular y uso de biogás. El marco comunitario exige restricciones a la incineración y promueve la valorización energética controlada. La ELP 2050 establece una reducción del 50 por 100 de emisiones del sector, principalmente a través del reciclaje, el compostaje y la reducción del 80 por 100 del vertido de residuos biodegradables. El PNIEC detalla el uso de residuos como fuente energética renovable, el impulso a la valorización energética sostenible y la integración del sector en los planes autonómicos de economía circular.

Gases fluorados. Aunque representan un porcentaje menor de emisiones, su potencial de calentamiento global es muy alto. La UE impulsa su eliminación progresiva, con restricciones normativas y tecnologías alternativas sin HFC (hidrofluorocarbonos). La ELP 2050 establece una reducción del 85 por 100 de emisiones respecto a 1990, mediante la eliminación de estos compuestos y su reemplazo por soluciones tecnológicas limpias y reciclaje de refrigerantes. El PNIEC propone medidas regulatorias para sustituir los HFC, establecer sistemas de recuperación, y reforzar la inspección y control de fugas industriales.

III. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS Y ESTADO DE LA CUESTIÓN

Los gráficos 1 a 3 representan el nivel de las series descritas en el Apéndice A. Las emisiones agregan las de CO₂ con las de otros GEI relevantes, como el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), expresadas todas ellas en kilotoneladas equivalentes de CO₂ (ktCO₂) (2). Por esta razón, en adelante nos

referiremos indistintamente a estas series como emisiones de GEI o de CO₂. Para facilitar la comparación temporal y expresarnos en los términos de los objetivos establecidos por la Ley Europea del Clima —que, recordemos, fija una reducción de al menos el 55 por 100 respecto a 1990—, el valor inicial de todas las series se ha normalizado a 100. Resaltamos los siguientes aspectos:

Primero, las emisiones brutas crecieron un 52 por 100 entre 1990 y 2005, para posteriormente iniciar una senda descendente (gráfico 1). En 2020, incluso con el efecto del COVID-19, las emisiones brutas totales fueron apenas un 6 por 100 inferiores a las de 1990. Las emisiones netas siguen un patrón paralelo: alcanzaron un máximo en 2007 (+57 por 100 respecto a 1990), cayendo de forma más acusada desde entonces, situándose un 12,5 por 100 por debajo del nivel de 1990 en 2023. Mientras tanto, la población española aumentó un 24 por 100 entre 1990 y 2023 (gráfico 1). Así, aunque las emisiones netas están aún lejos del objetivo del 55 por 100, las emisiones por habitante se han reducido un 24 por 100 en este período. Esto sugiere que fijar objetivos generales de reducción de emisiones sin considerar el crecimiento de la población en períodos prolongados dificulta de por sí su cumplimiento. Como se detalla en la siguiente subsección, la caída de las emisiones brutas per cápita se acelera de manera clara a partir de 2005.

Segundo, las emisiones brutas de CO₂ de los sectores productivos y los hogares presentan una dinámica parecida a la indicada por las emisiones totales (gráfico 2). Sin embargo, el ritmo de caída en las emisiones es más acelerado en los sectores productivos que en los hogares: en 2023 y respecto a 1990, un 6,2 por 100 menor en los sectores, pero un 1,8 por 100 mayor en los hogares.

Tercero, el VAB total (gráfico 3) tiene una evolución creciente, exceptuando la gran recesión 2008–2014 y la contracción de 2020 durante la pandemia del COVID-19. En conjunto, mientras el VAB real creció un 84 por 100 entre 1990 y 2023, las emisiones netas disminuyeron un 12,5 por 100, lo que indica un cierto desacoplamiento entre crecimiento económico y emisiones, acorde con la evidencia reciente para economías avanzadas

(IPCC, 2022). Esto contrasta, sobre todo a partir de 2007, con la evolución del consumo final energético (CFE), también en el gráfico 3, que presenta una dinámica paralela a la de las emisiones totales. Como puede apreciarse en el gráfico 3, las tasas de crecimiento del consumo energético son siempre más fuertes que las del VAB, tanto en expansiones como en recesiones. En 2021, última observación disponible para el CFE, su nivel es aún un 37,6 por 100 mayor al de 1990.

El año 1990 resulta especialmente relevante porque constituye el punto de referencia oficial para los objetivos de reducción de emisiones establecidos tanto en el Acuerdo de París como en la Ley Europea del Clima. Además, la década de los años noventa coincide con la primera fase de adopción de políticas de promoción de energías renovables en la mayoría de los países desarrollados (IEA, 2023), si bien algunos países —como Estados Unidos, España, Dinamarca o Portugal— habían iniciado esta transición incluso antes (Lorente-de-las-Casas y Marrero, 2025). El año 2020, sin embargo, refleja una situación excepcional marcada por la pandemia de COVID-19, lo que introduce distorsiones en la evolución estructural de las emisiones y del consumo energético (OCDE, 2021).

Para completar esta sección, el cuadro n.º 2 resume el estado de avance respecto a los objetivos descritos en el cuadro n.º 1, utilizando los datos de la Agencia Internacional de la Energía (IEA) y del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI). Este cuadro presenta las emisiones brutas y netas de GEI (en kilotoneladas equivalentes de CO₂ para 1990 —año base de la Ley Europea del Clima 2020—), último año disponible en la muestra del IEA, y 2023, último año disponible en la muestra del INGEI. De acuerdo con el IEA, en términos brutos, la reducción observada en 2020 es del 3 por 100 respecto a 1990, mientras que la reducción neta alcanza el 12 por 100. Esta mejora relativa de las emisiones netas se explica por un aumento del 41 por 100 en la absorción de GEI por los sumideros LULUCF (cuya fuente es el INGEI). Por otro lado, los sectores productivos han reducido sus emisiones un 5 por 100, mientras que las emisiones asociadas a los hogares se han incrementado un 21 por 100.

En síntesis, para cumplir con el objetivo de reducción neta del 55 por 100 fijado para 2030, las emisiones netas deberían disminuir un 43 por 100 adicional respecto a 2020. Cuando se usan series del INGEI, que proporciona datos hasta 2023, las cifras de reducción relativas a 1990 son muy parecidas: la ratio 2020/1990 es 0,87 y en 2023/1990 también es 0,87 (hay un repunte de esta ratio hasta 0,94 y 0,96 en 2021 y 2022, respectivamente, años de recuperación pos-COVID).

IV. LA DESCOMPOSICIÓN DE KAYA: NIVEL AGREGADO

En esta sección presentamos una metodología para la descomposición de las emisiones de CO₂ per cápita (Kaya y Yokoburi, 1997). Las emisiones son la suma del CO₂ emitido en cada momento de tiempo por la actividad de los sectores productivos, y las emisiones por la actividad de consumidores y hogares. En términos per cápita, las emisiones se descomponen de la siguiente manera:

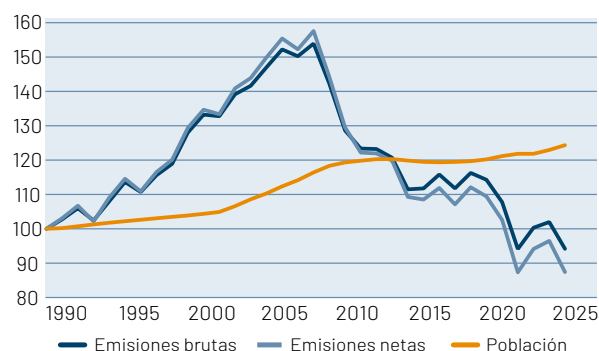
$$\frac{CO_{2t}}{Pob_t} = \frac{CO_{2t}^s}{Pob_t} + \frac{CO_{2t}^H}{Pob_t}, \quad [1]$$

donde Pob_t denota la población de hecho en el año t . Un trabajo pionero de la descomposición de Kaya para las emisiones de CO₂ para España entre 1980 y 1990 puede verse en Alcántara y Roca (1995), que no atiende a sectores de actividad, sino a consumidores primarios de energía. Más recientemente, Rivera-Niquepa *et al.* (2025) estiman una descomposición de Kaya para la desagregación sectorial recogida en el cuadro n.º A1 (Apéndice A), excluyendo los hogares, para el período 1995–2020.

De acuerdo con la identidad de Kaya, el nivel de las emisiones (totales, sectoriales y de los hogares) per cápita puede descomponerse del siguiente modo:

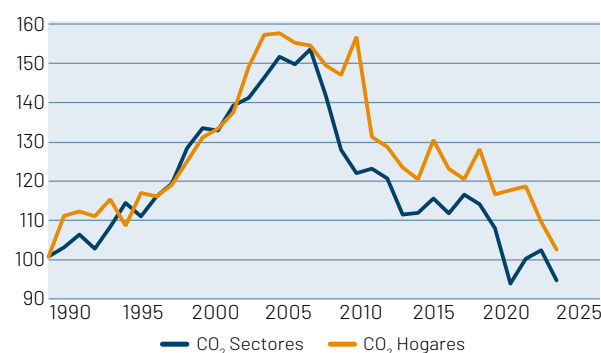
$$\frac{CO_2}{Pob} = \underbrace{\frac{CO_2}{CFE}}_{\text{Intensidad carbono}} \times \underbrace{\frac{CFE}{VAB}}_{\text{Intensidad energética}} \times \underbrace{\frac{VAB}{Pob}}_{\text{Actividad económica}}, \quad [2]$$

GRÁFICO 1
EMISIONES BRUTAS Y NETAS DE GEI Y POBLACIÓN
(1990=100)



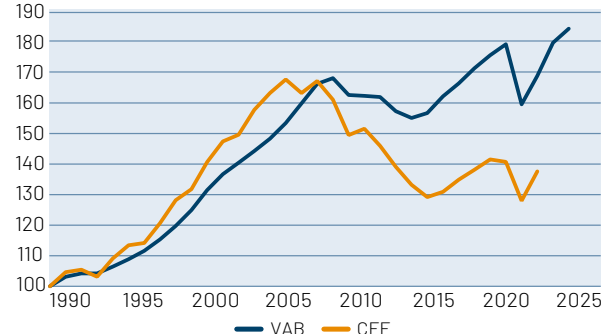
Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO 2
EMISIONES DE SECTORES Y HOGARES
(1990=100)



Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO 3
VALOR AÑADIDO BRUTO Y CONSUMO FINAL ENERGÉTICO
(1990=100)



Fuente: Elaboración propia.

donde recordamos que CFE denota el consumo final energético, y VAB representa el valor añadido bruto real de todos los sectores productivos (euros de 2020). Según se aprecia en la expresión [2], las emisiones totales per cápita pueden analizarse como el producto de la *intensidad del carbono*, la *intensidad energética* y la *dinámica de la actividad económica*. Como el consumo final energético CFE está medido en kilo-toneladas de petróleo equivalente (ktoe), el cociente entre el CO₂ emitido y CFE indica la intensidad del carbono en cada momento de tiempo, es decir, el CO₂ emitido por unidad ktoe energética empleada. Del mismo modo, la relación entre el consumo final energético y el VAB real, CFE/VAB, mide la intensidad con la que han sido

usados los recursos energéticos por cada unidad de producto final agregado, es decir, el consumo energético por unidad de producto final.

Del mismo modo, a partir de [1], la *tasa de crecimiento* del CO₂ per cápita puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \gamma_{co_2pc} &= \gamma_{co_2} - \gamma_{Pob} \\ &= \omega_{co_2} \underbrace{(\gamma_{co_2}^s - \gamma_{Pob})}_{\text{Sectores Productivos}} + (1 - \omega_{co_2}) \underbrace{(\gamma_{co_2}^H - \gamma_{Pob})}_{\text{Hogares}}, \quad [3] \end{aligned}$$

CUADRO N.º2
EMISIONES NETAS DE GEI Y OBJETIVOS (KTON. DE CO₂ EQUIV.), ESPAÑA 1990–2023

FUENTE IEA	1990	2020	2023	2020-1990	2023-1990
Emisiones brutas GEI a + b	206.283	200.191	-	0,97	-
(a) Sectores	192.882	183.975	-	0,95	-
(b) Hogares	13.401	16.216	-	1,21	-
(c) LULUCF	36.174	51.084	-	1,41	-
Emisiones netas GEI a + b - c	170.109	149.107	-	0,88	-
FUENTE INGEI	1990	2020	2023	2020-1990	2023-1990
Emisiones brutas GEI a + b	286.655	269.803	269.968	0,94	0,94
(a) Sectores	272.854	253.624	255.917	0,93	0,94
(b) Hogares	13.801	16.179	14.050	1,17	1,02
(c) LULUCF	36.174	51.084	51.033	1,41	1,41
Emisiones netas GEI a + b - c	250.481	218.719	218.935	0,87	0,87

Nota: Las emisiones brutas de GEI proceden del International Energy Agency (IEA), 1990-2020. Del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI), Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, hemos obtenido series de emisiones de GEI y LULUCF para 1990–2023. LULUCF indica "Usos del suelo, cambios de usos del suelo y silvicultura" (*Land Use, Land Use Change and Forestry*).

donde y_x (obviando el subíndice temporal t) representa la tasa de crecimiento de $x \in \{CO_2, Pobl\}$ y ω_{CO_2} indica la fracción de CO_2 emitida por todos los sectores productivos en relación con las emisiones totales:

$$\omega_{CO_2}^S = \frac{CO_{2t}^S}{CO_{2t}^S + CO_{2t}^H}$$

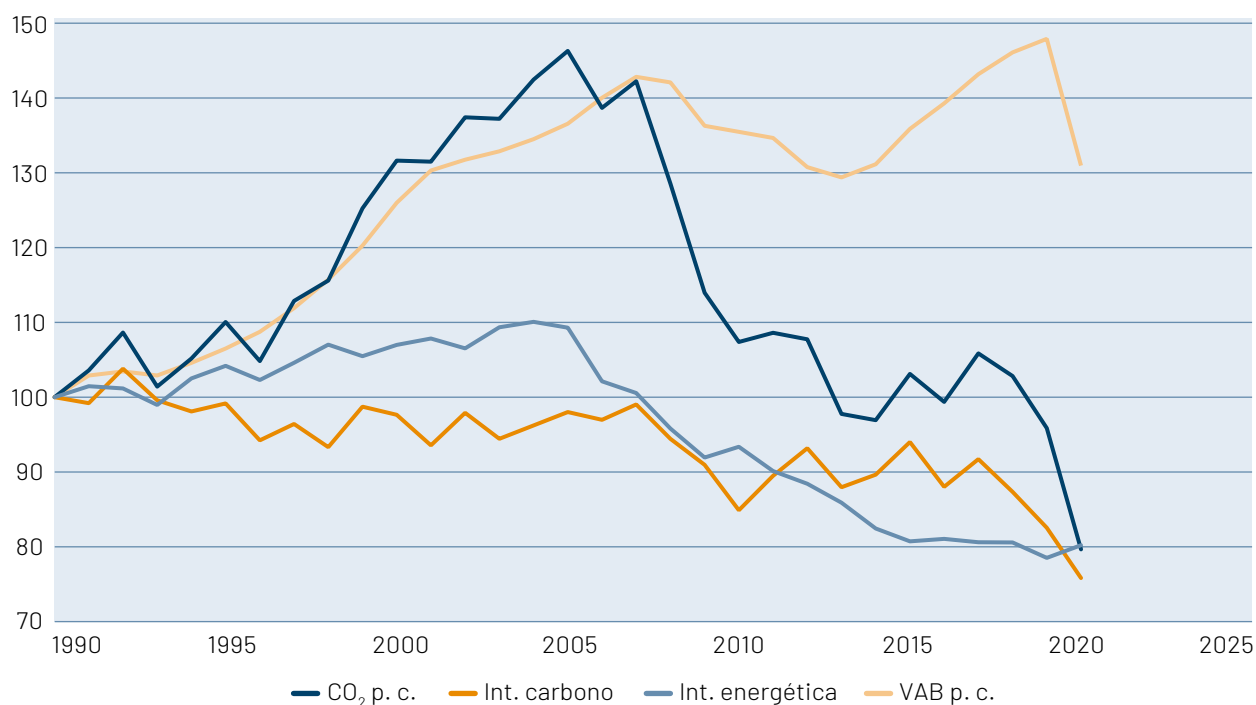
De esta manera, analizaremos la dinámica de las emisiones per cápita tanto a escala agregada como de forma separada para los sectores productivos y los hogares.

La descomposición indicada en la expresión [2] está representada en el gráfico 4 usando los datos del IEA (los niveles iniciales de 1990, momento de referencia, han sido normalizados

a 100). La evolución de las emisiones brutas y del VAB ya fue descrita en los gráficos 1 a 3. Se observa que, durante la primera mitad de la muestra hasta 2005, la evolución de las emisiones estuvo gobernada por la actividad económica. En este período la intensidad en carbono casi no varió y la intensidad energética incluso aumentó, pero en mucha menor medida que las emisiones y la actividad económica.

Esta coevolución (CO_2 -VAB) se revierte claramente a partir de la segunda mitad de la muestra. Desde el pico máximo de 2005 (un 46 por 100 mayor que en 1990), las emisiones per cápita entran en una senda descendente y se reducen un 66 por 100 entre 2005 y 2020. La caída a partir de 2005 está guiada por la moderación en la intensidad del carbono (CO_2/CFE), pero sobre todo por la caída en la intensidad energética (CFE/VAB) - casi un 30 por 100 entre 2005 y 2020.

GRÁFICO 4
DESCOMPOSICIÓN DE LAS EMISIONES DE CO_2 PER CÁPITA (P. C.)
(1990=100)



Fuente: Elaboración propia.

Para entender mejor esta evolución, el gráfico 5 representa la descomposición según la expresión [2] para sectores productivos y hogares por separado (3). En los sectores productivos, que representan el 93 por 100 de las emisiones brutas totales, la caída en las emisiones está vinculada a la desaceleración de la intensidad energética, con cierta contribución de la intensidad del carbono hacia el final del período analizado (probablemente reflejando el año de la pandemia). En los hogares, aunque el perfil tendencial y cíclico es similar, la caída de las emisiones en el conjunto del período es más modesta y está asociada, principalmente, a la reducción en la intensidad del carbono.

En conjunto, este análisis agregado muestra que España ha logrado un cierto desacoplamiento entre actividad económica y emisiones desde 2007 en adelante. Sin embargo, el ritmo de reducción observado no es suficiente para asegurar la senda hacia el -55 por 100 en 2030, por lo que es necesario descender al análisis sectorial para identificar dónde puede acelerarse la descarbonización.

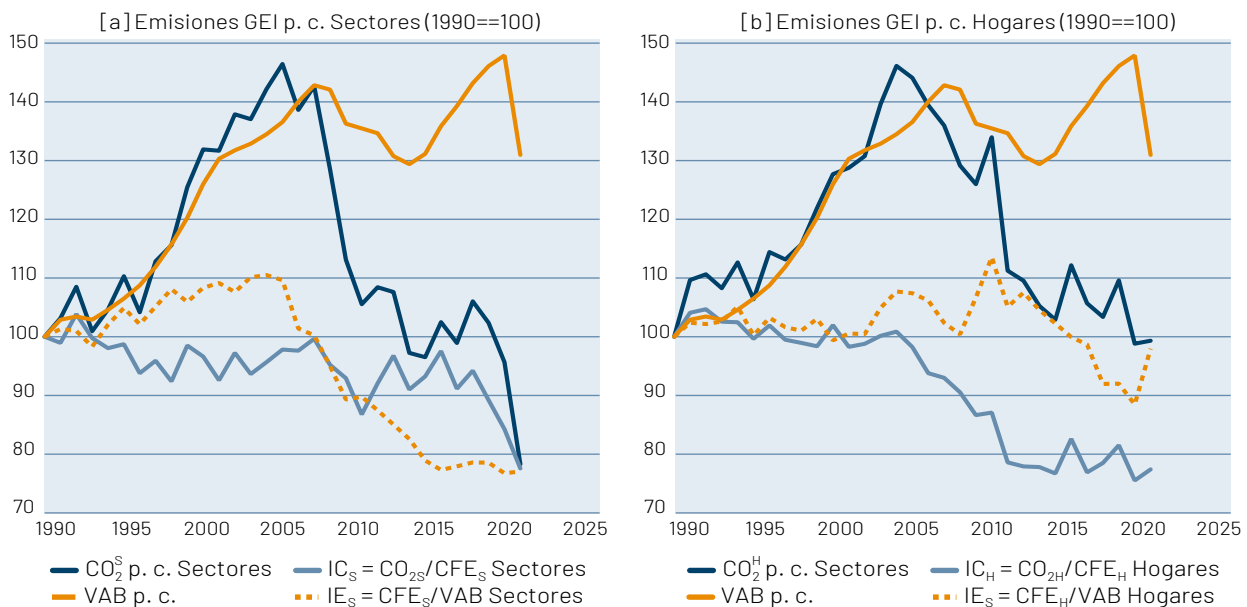
Por último, aplicando tasas de variación logarítmicas sobre la expresión [2] se obtiene la tasa de crecimiento de las emisiones per cápita como la suma de las tasas de crecimiento de la intensidad del carbono, la intensidad energética y del VAB total per cápita:

$$Y_{co2pc} = Y_{co2} - Y_{Pop}$$

$$\underbrace{(Y_{co2} - Y_{CFE})}_{Int. \text{ carbono}} + \underbrace{(Y_{CFE} - Y_{VAB})}_{Int. \text{ energética}} + \underbrace{(Y_{VAB} - Y_{Pop})}_{Actividad \text{ econ.}}, \quad [4]$$

El cuadro n.º 3 presenta la descomposición del crecimiento de las emisiones de CO₂ per cápita para España, a partir de las expresiones [3] y [4]. Se ha sintetizado el análisis en cinco periodos de tiempo (4): (i) el período inicial 1990-1994 tras la reunificación de Alemania, marcado por el fin de una expansión que dio comienzo tras la incorporación de España a la CEE y por el inicio de una recesión (alrededor del tercer trimestre de 1992), condicionada por los ajustes en el mecanismo de

GRÁFICO 5
DESCOMPOSICIÓN DE LAS EMISIONES DE CO₂ PER CÁPITA (P. C.) EN SECTORES Y HOGARES
(1990=100)



Fuente: Elaboración propia.

tipos de cambio del Sistema Monetario Europeo anterior al euro; (ii) el período de expansión que sigue al proceso de adaptación e implementación del euro, 1995-2007; (iii) la recesión tras el colapso financiero y del crédito, 2008-2014; (iv) el período de recuperación 2015-2019; y (v) el peculiar año 2020, de la pandemia del COVID-19.

Las tasas de crecimiento del cuadro n.º 3 están expresadas en términos anuales y se calculan como promedio de cada período. A luz del cuadro n.º 3, llegamos a las siguientes conclusiones.

En primer lugar, las tasas de crecimiento per cápita están guiadas por el crecimiento de las emisiones totales, según se aprecia en la fila (a), "Emisiones de CO₂". De hecho, a partir de la recesión de 2008, la población crece poco (en torno a un 0,4 por 100). Además, este crecimiento de las emisiones está determinado por la actividad de los sectores productivos (fila (c) contribución de los "Sectores"), cuyo peso supone algo más del 93 por 100 de esta dinámica. Los hogares pesan poco y sus emisiones apenas contribuyen (fila (d), contribución de los "Hogares").

CUADRO N.º 3
TASAS MEDIAS DE CRECIMIENTO DE EMISIONES DE CO₂, 1990-2020

		1990-1994	1995-2007	2008-2014	2015-2019	2020
Emisiones CO ₂ per cápita	$\gamma_{CO_2pc} = a - b = c + d = e + f + g$	1,5	2,7	-4,8	0,3	-16,5
(a) Emisiones brutas CO ₂	γ_{CO_2}	1,9	3,7	-4,4	0,6	-16,0
(b) Población	γ_{Pob}	0,4	1,0	0,4	0,3	0,5
Peso emisiones sectores	ω_{CO_2}	0,932	0,935	0,930	0,932	0,919
Peso emisiones hogares	$(1 - \omega_{CO_2})$	0,068	0,065	0,070	0,068	0,081
Crec. CO ₂ per cápita sectores	$\gamma_{CO_2pc}^S$	1,4	2,7	-4,8	0,4	-17,9
Crec. CO ₂ per cápita hogares	$\gamma_{CO_2pc}^H$	3,1	1,5	-3,7	-0,6	0,5
(c) Sectores	$\omega_{CO_2} \cdot \gamma_{CO_2pc}^S$	1,3	2,6	-4,5	0,3	-16,4
(d) Hogares	$(1 - \omega_{CO_2}) \cdot \gamma_{CO_2pc}^H$	0,2	0,1	-0,3	0,0	0,0
(e) Intensidad del carbono	CO ₂ /CFE	-0,4	0,2	-1,0	-1,3	-7,5
(f) Intensidad energética	CFE/VAB	0,6	0,0	-2,6	-0,9	2,4
(g) Actividad económica	VAB/Pob	1,2	2,5	-1,1	2,5	-11,5

Nota: Las series de emisiones (brutas y netas) de CO₂ y de consumo final energético proceden del International Energy Agency (IEA). Las series de VAB sectoriales proceden del Instituto Valenciano de investigaciones Económicas (Ivie), nominales y reales a precios constantes de 2020. Las series de población proceden del Instituto Nacional de Estadística (INE). Las ponderaciones son calculadas a partir de una media móvil entre las ponderaciones del año actual y del anterior. Las tasas de crecimiento de este cuadro están expresadas en términos anuales y se calculan como el promedio de cada período.

Segundo, en lo que se refiere a qué factor ha condicionado esta dinámica (i.e., crecimiento del 2,7 por 100 durante la expansión, y decrecimiento desde la recesión en adelante), los resultados no son tan definitivos. La intensidad del carbono (fila e) ha contribuido a moderar el ritmo de emisiones durante toda la serie, acelerándose su ritmo de caída a partir de 2008 (5). En 2020, la intensidad del carbono presenta una contracción del 7,5 por 100. La intensidad energética (fila f) también tiene una contribución media negativa (6), pero con un fuerte incremento del 2,4 por 100 en 2020 relativo a 2019. La actividad económica (fila g), medida como el crecimiento del VAB per cápita, presenta una correlación positiva y paralela con las emisiones, esto es, las variaciones medias de ambas tasas de crecimiento van siempre en el mismo sentido.

Aunque en ningún caso el análisis realizado permite sacar conclusiones causales ni hacer recomendaciones de política energética, los resultados sí sugieren que España está avanzado en la dirección correcta en términos de intensidades —tanto energética como de carbono—, pero el ajuste requerido para alcanzar los objetivos de 2030 sigue siendo considerable. La mejora reciente no garantiza por sí sola el cumplimiento de los compromisos europeos.

En este sentido, Díaz *et al.* (2019) para una muestra amplia de 134 países durante 1960-2010, analizan la relación entre el crecimiento económico, la intensidad energética, y el mix energético. Estos autores encuentran una correlación negativa entre el crecimiento y la intensidad energética (habitual en la literatura), en cierto modo similar a la que se sugiere en el cuadro n.º 2: mientras mayor es la intensidad energética (i.e., menos eficiente es el uso de energía respecto a la actividad generada), menor es el crecimiento del PIB per cápita. En media, de acuerdo con estos autores, la elasticidad del crecimiento per cápita respecto a la intensidad energética varía entre -0,5 y -1,0. Esta correlación negativa se sostiene tanto para países avanzados, en desarrollo y emergentes. Al mismo tiempo, Díaz *et al.* (2019) reportan evidencia de que la transición desde energías producidas por fuentes fósiles hacia energías renovables pero convencionales, en lugar de las

renovables avanzadas (eólicas, fotovoltaicas o geotérmicas), podría generar problemas de crecimiento y desarrollo económico.

1. Sectores productivos

Tras analizar el comportamiento agregado, resulta necesario estudiar qué sectores explican la mayor parte de la reducción (o incremento) en emisiones, especialmente considerando su relevancia de cara a los objetivos climáticos de los próximos años. Así, aplicamos la metodología establecida en la expresión [4] al crecimiento de las emisiones brutas de los sectores de actividad. Consideramos la actividad productiva agregada en los seis sectores del cuadro n.º 2 y ponderamos las distintas tasas sectoriales de crecimiento ($Y_{\tilde{x},x}^S = \{CO_2, CFE, VAB\}$) del siguiente modo:

$$\underbrace{(Y_{CO_2}^S - Y_{CFE}^S)}_{\text{Int. carbono}} = \sum_{s=1}^6 (\omega_{CO_2}^S \cdot Y_{CO_2}^S - \omega_{CFE}^S \cdot Y_{CO_2}^S)$$

$$\underbrace{(Y_{CFE}^S - Y_{VAB}^S)}_{\text{Int. energética}} = \sum_{s=1}^6 (\omega_{CFE}^S \cdot Y_{CFE}^S - \omega_{VAB}^S \cdot Y_{VAB}^S)$$

$$\underbrace{(Y_{VAB}^S - Y_{POB}^S)}_{\text{Actividad econ.}} = \sum_{s=1}^6 \omega_{VAB}^S (Y_{VAB}^S - Y_{POB}^S),$$

donde $\{\omega_{CO_2}^S, \omega_{CFE}^S, \omega_{VAB}^S\}_{S=1}^6$ denotan los pesos sectoriales de las emisiones brutas, el consumo final energético y el VAB, respectivamente (7). En el Apéndice A, el cuadro n.º A2 presenta un resumen de los pesos sectoriales. Por sí solos, tres sectores, industria, energía y transportes, emiten algo más del 92 por 100 de los GEI. Industria y transporte realizan un 70 por 100 del consumo energético. El sector servicios, que excluye conscientemente al transporte, concentra algo más del 70 por 100 de la actividad económica y emite tan solo un 3,5 por 100 de los GEI, si bien su peso sobre el consumo final de energía ha pasado del 7 por 100 al 15,5 por 100. Además, la participación del sector servicios en el VAB total ha aumentado unos 12 puntos porcentuales desde 1990, mientras que los sectores industriales y la construcción han cedido cerca de 10 puntos de

CUADRO N.º 4

TASAS MEDIAS DE CRECIMIENTO DE LAS EMISIONES BRUTAS SECTORIALES, 1990-2020

		1990-1994	1995-2007	2008-2014	2015-2019
Emisiones brutas Sectores p. c.	$\gamma_{CO_2pc} = a - b = c + d + e$	1,4	2,7	-4,8	0,4
(a) Emisiones brutas Sectores CO ₂	$\gamma_{CO_2^S}$	1,8	3,8	-4,5	0,6
(b) Población	γ_{Pob}	0,4	1,0	0,4	0,3
(c) Intensidad del carbono	CO_2^S/CFE^S	-0,4	0,2	-0,6	-1,6
(d) Intensidad energética	CFE^S/VAB	0,5	0,0	-3,2	-0,5
(e) Actividad económica	VAB/POB	1,2	2,5	-1,1	2,5

Nota: Las series de emisiones (brutas y netas) de CO₂ y de consumo final energético proceden del International Energy Agency (IEA). Las series de VAB sectoriales proceden del Instituto Valenciano de investigaciones Económicas (Ivie), nominales y reales a precios constantes de 2020. Las series de población proceden del Instituto Nacional de Estadística (INE). Las tasas de crecimiento de este cuadro están expresadas en términos anuales y se calculan como el promedio de cada período.

participación. Este cambio en la composición sectorial explica, como ilustra el gráfico 1, que el VAB real haya crecido un 60 por 100 en 2020 respecto a 1990, al mismo tiempo que las emisiones *netas* totales de GEI se hayan reducido un 12 por 100.

Una vez hecha la ponderación, la descomposición del crecimiento de los GEI emitidos por la actividad de los sectores productivos en intensidad del carbono, intensidad energética y actividad económica, se presenta en el cuadro n.º 4. Las tasas de crecimiento per cápita son idénticas a los del cuadro n.º 3 (tasas anuales medias para cada período). La descomposición cuantifica de forma clara la dinámica anticipada en el gráfico 3a. Entre 1990 y 2007, el crecimiento de las emisiones está guiado por el fuerte crecimiento de la actividad económica (*i.e.*, el crecimiento del VAB per cápita (p. c.) explica un 90 por 100 de cada punto porcentual del crecimiento de los GEI entre 1995 y 2007). Por su parte, a partir de 2008, 2/3 de la caída en las emisiones está explicada por la reducción de la intensidad energética, y en el período final, 2015–2019, la caída en la intensidad del carbono es 3,6 veces mayor.

El cuadro n.º 5 resume la contribución sectorial al *crecimiento* de las emisiones brutas per cápita. Cada cifra indica promedios anuales. El sector transporte es el sector que más contribuye al crecimiento de emisiones: en los períodos 1990-1994 y 1995-2007 su contribución fue el 71,4 por 100 y 51,9 por 100, respectivamente. Entre 2015 y 2019 su contribución fue compensada casi exclusivamente por las importantes reducciones del sector energía, sugiriendo la efectividad en la introducción de energías renovables en la generación de electricidad. Hay que destacar también que el sector servicios siempre ha reducido su contribución a las emisiones en todo el período analizado. El sector transporte incluye las emisiones procedentes de la combustión para toda la actividad de transporte, con independencia del sector. Esto abarca la aviación nacional, la navegación nacional, el transporte por carretera, el ferrocarril y los transportes por tubería (oleoducto/gasoducto)(8).

Como ejercicio complementario, hemos desglosado la contribución de cada uno de los sectores a las intensidades del carbono y energética

CUADRO N.º 5
CONTRIBUCIÓN SECTORIAL AL CRECIMIENTO DE EMISIONES BRUTAS PER CÁPITA

	1990-1994	1995-2007	2008-2014	2015-2019
Primario	0,1	0,0	0,0	0,0
Industria	0,1	0,3	-0,9	0,3
Energía	0,3	1,8	-2,1	-0,9
Construcción	0,0	-0,1	0,2	0,0
Servicios(excepto Transporte)	-0,1	-0,6	-0,2	-0,1
Transporte	1,0	1,4	-1,8	1,0
Emisiones brutas CO ₂ p. c.:	1,4	2,7	-4,8	0,4

y al crecimiento del VAB total p. c. que hemos expuesto de forma agregada el cuadro n.º 4 (véase los cuadros B1 del Apéndice B). Si bien hay que interpretar los resultados de este ejercicio con cautela, dado que estamos tomando ponderaciones sectoriales distintas sobre el VAB total, sobre el consumo final y sobre las emisiones brutas, sus resultados robustecen el análisis realizado. *Primero*, los servicios y los transportes fueron los que más contribuyeron a la descarbonización entre 1990 y 2007. A partir de 2008 en adelante, la reducción de la intensidad del carbono está guiada por el sector energético. *Segundo*, la caída en la intensidad energética a partir de 2005, como ya anticipaba el gráfico 3a, está asociada a la mayoría de los sectores, salvo la construcción en 2008-2014 (1.2) y el transporte en 2015-2019. Los servicios reducen la intensidad en el uso energético desde el comienzo de la muestra. Pero es el transporte el sector que de manera más decisiva *ha contribuido* a la evolución de la intensidad energética a lo largo de todos estos años. Durante la recesión de

2008-2014, hay una fuerte disminución de la *contribución* de la intensidad energética del sector, medida como CFE_s/VAB_s . *Finalmente*, la actividad económica está gobernada por los servicios, cuya participación en el VAB total (y contribución al crecimiento del mismo) ha sido creciente durante estos años. Exceptuando los transportes (sector H 49-53), los servicios representaron en 2015-2019 el 70 por 100 del VAB, pero sus emisiones representan un 3,5 por 100 de las emisiones de los sectores productivos. Incluso, para este mismo período de tiempo, en lo que se refiere a las emisiones totales, la participación de los servicios (excluyendo al transporte) en las emisiones fue menos de la mitad que la de los hogares: 3,3 por 100 versus 6,8 por 100.

En conjunto, estos resultados indican que el esfuerzo adicional que España debe realizar de aquí a 2030 deberá concentrarse, principalmente, en los sectores de industria, energía y, especialmente, transporte, que sigue siendo el mayor contribuyente neto a las emisiones. El sector

servicios, en cambio, actúa como un elemento de alivio estructural, aumentando su peso en el VAB mientras mantiene niveles bajos de emisiones.

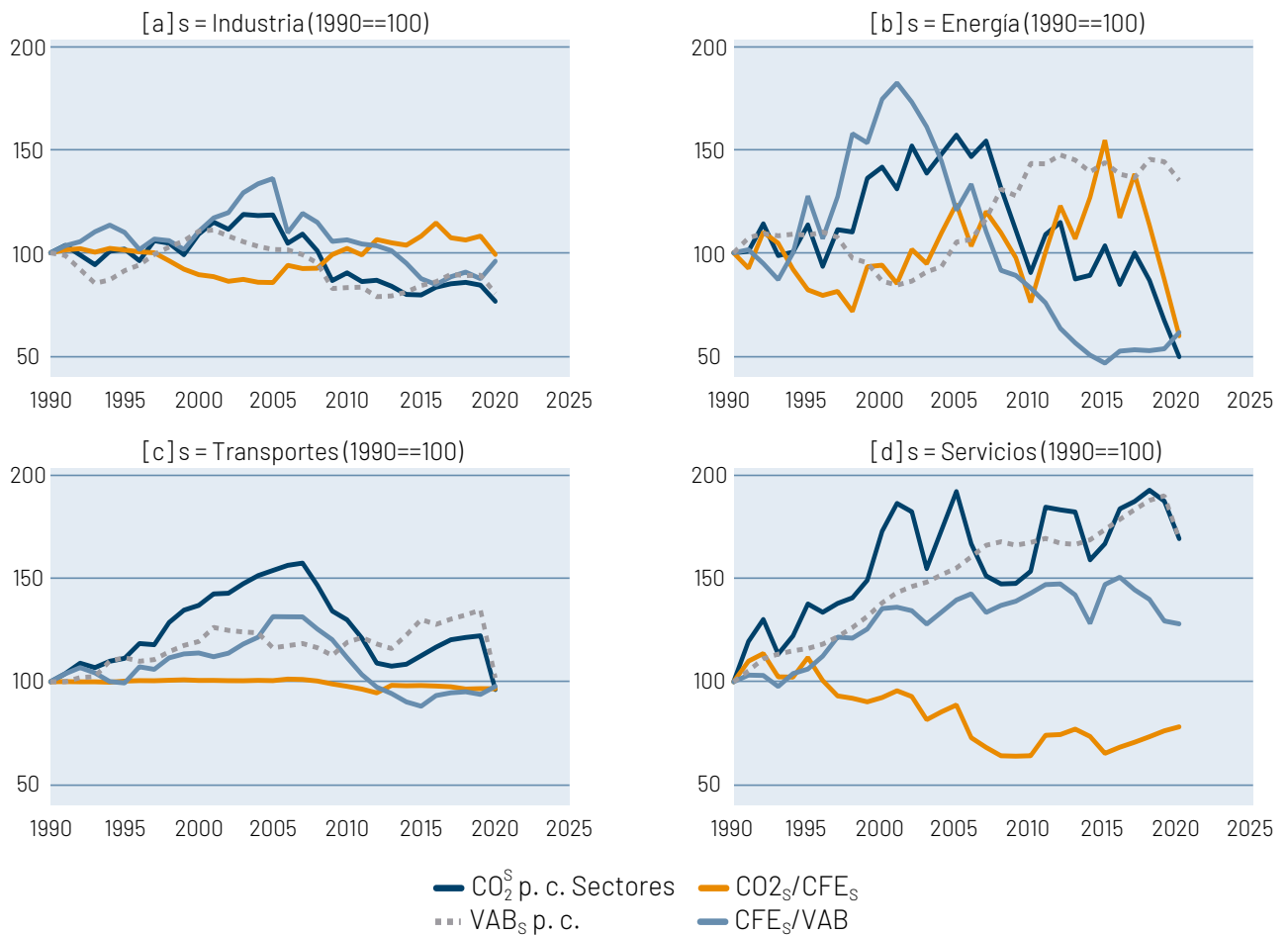
El papel de la industria, la energía y los transportes

A continuación, indagamos en los tres sectores de actividad que más contribuyeron al flujo de emisiones totales, la industria, la energía, y los transportes, junto con el sector que mayor

aportación hace al crecimiento económico, los servicios (excepto los transportes).

El gráfico 6 proporciona la descomposición de los niveles de acuerdo con la expresión [2]. Hay tres patrones comunes a la dinámica de las emisiones de GEI en la industria, la energía, y los transportes (paneles a, b y c, gráfico 6), que condiciona el flujo de las emisiones totales (estos tres sectores responden por sí solos de cerca de un 90 por 100 de las emisiones totales). *Primero*, las tres series presentan un crecimiento entre 1990 y 2005,

GRÁFICO 6
EL PAPEL DE LOS SECTORES CLAVE



Fuente: Elaboración propia.

y una caída posterior, que es más acusada en la industria y la energía, pero menos en los transportes (cuyos niveles per cápita en 2020 fueron similares a los de 1990).

Segundo, en estos tres sectores la evolución de los GEI emitidos (aumento hasta 2005, disminución posterior) está guiada por la intensidad energética, sobre todo en el sector de la energía (cuya caída desde antes de 2005 es espectacular).

Tercero, la reducción en la intensidad del carbono (CO_2/CFE), contribuye poco a la reducción de emisiones de los GEI. La intensidad del carbono tiene una evolución un tanto errática y peculiar en la energía, cuya actividad debiera estar recogiendo el reemplazo de fuentes energéticas emisoras por fuentes no-emisoras (como las renovables), tal como se indicó anteriormente. Habría que disponer de datos más precisos para ver en qué medida el desmantelamiento de plantas nucleares (fuentes no-emisoras) ha condicionado los vaivenes de la intensidad del carbono en la energía, según se aprecia en el gráfico 6b.

En el transporte, es especialmente llamativa la ausencia de descarbonización a lo largo de estas tres décadas (gráfico 6c). Solo la contribución de los avances tecnológicos en la eficiencia de la combustión de combustibles fósiles parece condicionar las emisiones de los transportes, pero la relación entre emisiones y energía consumida es muy estable durante todo el período en este sector. Andreoni y Galmarini (2012) destacan que entre 2001 y 2008, para países de la UE-27, el crecimiento de las emisiones de CO_2 en el sector de transporte está determinado por el crecimiento económico. Esto se ve reflejado en este trabajo si consideramos el cambio de signo en la contribución de este sector para los distintos períodos (cuadro n.º B1 del Apéndice B). Precisamente en el período 2008-2014, de crisis económica, la contribución del sector transportes a las emisiones brutas per cápita es -1,8, un 37,5 por 100 del total de la caída. El sector energía lideró esta caída con un 43,8 por 100.

Como señalan Marrero *et al.* (2021), el transporte es el principal contribuyente de las emisiones de CO_2 en Europa, un 27 por 100 (en España,

recordemos, un 37 por 100 y subiendo), y está condicionando las políticas de reducción de emisiones en la Unión Europea. Estos autores aportan evidencia de una convergencia condicional en las emisiones de CO_2 del transporte entre países europeos. Además, no encuentran evidencia de clubes de convergencia en emisiones de CO_2 del transporte. La relevancia de este tipo de convergencia radica en que los países comparten patrones similares en el crecimiento de estas emisiones, más o menos determinado por la homogeneidad entre países europeos. Por el contrario, en un club de convergencia, cada club presentaría su propio patrón de crecimiento determinado por las condiciones iniciales, un resultado que suele observarse para una muestra más heterogénea (por ejemplo, entre países de la OCDE).

Por otra parte, la dieselización del parque de vehículos industriales y de turismo desde comienzos de los noventa ha podido condicionar la dinámica tanto de la intensidad del carbono como la energética de los transportes, según se dibuja en el gráfico 6c. Marrero *et al.* (2020), usando un modelo de equilibrio general dinámico donde diferencian vehículos de gasolina y gasóleo (motores diésel), llegan a una conclusión que contradice ciertas “creencias” extendidas en Europa: la dieselización no ayudó a reducir ni el consumo energético ni las emisiones de CO_2 del parque de vehículos. Usando el modelo, concluyen, además, que el impuesto especial sobre los hidrocarburos, gasolina y gasóleo es ineficiente y debería tener en cuenta la mayor carga de CO_2 de cada litro de gasóleo por cada litro de gasolina, +14,5 por 100 (véase Environmental Protection Agency, 2011; Santos, 2017). Conforme a este resultado, el hecho de haber favorecido el uso del gasóleo frente a la gasolina generó un efecto reemplazo de vehículos de gasolina por vehículos diésel, y un efecto rebote en el uso de los vehículos diésel, que no fue eficiente y no ayudó a reducir las emisiones (los resultados del análisis de panel de González *et al.* (2019), corroboran estas conclusiones) (9). Así, estos efectos negativos, según concluyen estos autores, sobrepasaron los efectos positivos de disponer de un parque de vehículos con menor intensidad energética (los motores diésel consumen entre un 12 por 100 y un 15 por 100 menos de combustible por kilómetro recorrido).

Aunque las medidas tecnológicas orientadas a la mejora de la eficiencia de los vehículos y su electrificación han tenido resultados positivos, no han sido suficientes. Según Tzeiranaki *et al.* (2023), incluso bajo escenarios de elevada electrificación y eficiencia energética, el transporte por carretera europeo no alcanza los objetivos climáticos sin medidas adicionales como el cambio modal y la reducción de la demanda de movilidad. Las políticas de cambio modal, por tanto, resultan esenciales para una reducción sostenida de las emisiones del transporte. Este enfoque implica desplazar viajes desde el vehículo privado hacia el transporte colectivo (urbano e interurbano) así como hacia modos activos de movilidad (bicicleta, desplazamientos peatonales), y desplazar el transporte de mercancías por carretera hacia el tren (Jing *et al.*, 2022; Gamage *et al.*, 2025). Este cambio modal tiene un gran potencial al reducir significativamente los kilómetros recorridos por vehículos privados y, con ello, la energía consumida por pasajero-kilómetro.

Por tanto, las mejoras tecnológicas (por ejemplo, electrificación de vehículos) por sí solas no garantizan reducciones profundas de emisiones del transporte: se requiere combinar la electrificación con cambios modales que incrementen la participación del transporte público y modos activos. Por ejemplo, un estudio aplicado al transporte de pasajeros en British Columbia muestra que los objetivos de reducción de emisiones solo se alcanzan cuando se combina una elevada electrificación con un aumento significativo del transporte colectivo y la movilidad activa, ilustrando la importancia de políticas que integren ambos enfoques (Atabaki *et al.*, 2023).

Completando este apartado, hay que resaltar que las emisiones de GEI de los servicios son crecientes (panel d, gráfico 6), guiadas por el crecimiento económico y una creciente intensidad energética a lo largo de los años de la muestra, que contrasta con la caída de esta intensidad en los otros sectores. La intensidad del carbono, emisiones de CO₂ por unidad energética empleada, es decreciente en el sector servicios, lo que contrarresta la subida de la intensidad energética. En cualquier caso, la aportación de los servicios (excepto transportes) al CO₂ emitido es marginal en comparación con los otros tres sectores indicados.

De esta manera, el efecto composición, resultado del aumento de la participación de los servicios en el VAB total, ayudaría a explicar la reducción de emisiones a partir de 2005.

2. Hogares

Finalmente, estudiamos los hogares. El uso de energía en electrodomésticos, automóviles y viviendas genera emisiones de gases de efecto invernadero, según fue descrito en el gráfico 3b.

La predicción del consumo energético y las emisiones por parte de las familias es una cuestión complicada. Por ejemplo, Davis *et al.* (2014) analizaron los efectos de una política en México de subsidios al reemplazo de frigoríficos y aparatos de aire acondicionado en 1,9 millones de hogares. El reemplazo de frigoríficos, según concluyen, contribuyó a reducir la intensidad energética de los hogares, pero el de aparatos de aire acondicionado aumentó el consumo energético y las emisiones de CO₂ asociadas. Este hecho se entiende dada la diferente elasticidad de uso de estos equipos respecto al coste operativo: los frigoríficos tienen una elasticidad nula o muy baja, mientras que los aparatos de aire tienen una elasticidad bastante alta. Marrero *et al.* (2020), como ya se ha mencionado, analizaron los efectos de los impuestos especiales sobre los hidrocarburos en Europa, advirtiendo que su diseño es ineficiente, generando un exceso de emisiones y un aumento en la intensidad energética.

En los hogares, la reducción observada depende en mayor medida de la intensidad del carbono y, más recientemente, de mejoras en eficiencia energética (gráfico 3b). Sin embargo, su peso relativo puede aumentar en la medida en que otros sectores se descarbonizan más rápidamente, por lo que las políticas de eficiencia en edificios, movilidad y consumo energético adquieren una importancia creciente.

El cuadro n.º 6 cuantifica estas observaciones descomponiendo las tasas de crecimiento de las emisiones de los hogares siguiendo la expresión [4]. *Primero*, el consumo energético suele ser

CUADRO N.º 6

TASAS DE CRECIMIENTO MEDIO PER CÁPITA (P. C.) DE LAS EMISIONES BRUTAS DE LOS HOGARES, 1990-2020

		1990-1994	1995-2007	2008-2014	2015-2019
Emisiones brutas Hogares p. c.	$\gamma_{CO_2pc} = a - b = c + d + e$	3,1	1,5	-3,7	-0,6
(a) Emisiones brutas Hogares CO ₂	$\gamma_{CO_2^H}$	3,6	2,6	-3,3	-0,3
(b) Población	γ_{Pob}	0,4	1,0	0,4	0,3
(c) Intensidad del carbono	CO_2^H/CFE^H	0,7	-0,7	-2,6	-0,1
(d) Intensidad energética	CFE^H/VAB	1,2	-0,2	0,0	-2,9
(e) Actividad económica	VAB/Pob	1,2	2,5	-1,1	2,5

inelástico respecto a la renta (salvo en el primer período indicado 1990-1994, donde las tasas de crecimiento de la intensidad energética y del VAB per cápita son iguales), por lo que la actividad económica es crucial. *Segundo*, desde 1995 la intensidad del carbono presenta una moderación que se acelera a partir de 2008 en adelante, paralelo a la implementación de las políticas que favorecen las energías renovables. *Tercero*, como ya se ha señalado, la contribución de la intensidad energética es clave en 2015-2019 (-2,9 por 100), que permite sobrecompensar el empuje de la actividad económica (+2,5 por 100) sobre las emisiones.

De cara a 2030, los hogares pueden desempeñar un papel significativo en la reducción de emisiones si se refuerzan políticas orientadas a electrificación, eficiencia y señales de precios coherentes. Sin ello, es posible que el componente doméstico limite la capacidad global del país para cumplir con los objetivos climáticos.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos presentado los principales objetivos por sectores clave recogidos en la normativa europea, la ELP 2050 y el PNIEC

2023-2030. A su vez, usando series del IEA, se ha realizado un ejercicio de descomposición del crecimiento de los GEI, agregado y desagregado, para identificar qué factores y qué sectores están gobernando la evolución de estas emisiones. Nuestras conclusiones han sido las siguientes.

En primer lugar, según los datos del INGEI, las emisiones netas de GEI en 2023 representan un 87,5 por 100 de las de 1990. En consecuencia, a falta de menos de una década, España está aún lejos del objetivo del 55 por 100 (> 12,5 por 100) requerido por la Ley Europea del Clima. Esta comparación simple muestra que, aunque existen avances relevantes, la magnitud de la reducción pendiente entre los años 2026 y 2030 sigue siendo elevada, lo que exigirá una aceleración muy importante en la reducción de emisiones entre 2026 y 2030, incluso asumiendo mejoras en los datos aún no publicados de 2024 y 2025.

En segundo lugar, desde la segunda mitad de los 2000, se ha producido una caída crucial en las emisiones netas. De acuerdo con la descomposición realizada, la reducción ha estado asociada a la mejora en la eficiencia energética, a una modesta mejoría en la intensidad del carbono (i.e., la manera en la que producimos energía), y a que el peso de los

sectores de servicios sobre el VAB total, que son actividades que emiten poco (3 por 100 del total), ha aumentado considerablemente. Entre 1990 y 2005, las emisiones estuvieron muy condicionadas por el crecimiento del VAB per cápita.

Esto sugiere un cambio estructural en la forma en la que la economía española produce y utiliza la energía. El ritmo de caída en las emisiones es más acelerado en los sectores productivos que en los hogares, como consecuencia de la fuerte moderación en la intensidad energética. En los hogares, la caída es más modesta y, como hemos visto, está asociada a la reducción de la intensidad del carbono.

Es de reseñar la caída de la intensidad energética, así como de sus emisiones, en el sector de la energía. Desde la primera mitad de los 2000, la intensidad energética muestra una tendencia decreciente, moderando su caída a partir de 2015, y condicionando las emisiones de este sector.

En tercer lugar, el verdadero margen de reducción de emisiones que aún queda por consolidar es el de la intensidad del carbono, sobre todo en lo referente al transporte, que muestra una evolución plana a pesar de las medidas implementadas. Esto indica un escaso margen de sustitución de fuentes energéticas en el transporte, especialmente en vehículos pesados, maquinaria de transporte de mercancías y flotas de uso intensivo. La electrificación del parque de vehículos de turismo puede facilitar una mayor reducción de emisiones, siempre y cuando las fuentes energéticas sean poco intensivas de carbono. Los resultados ponen de relieve la importancia de complementar las estrategias tecnológicas con políticas públicas de cambio modal, como el fomento del transporte colectivo, el coche compartido y la movilidad activa. Aunque el PNIEC 2023-2030 ya recoge medidas explícitas en esta línea (por ejemplo, zonas de bajas emisiones, mejora del transporte público y de la infraestructura para movilidad activa), sigue siendo necesario profundizar en los patrones de movilidad urbana.

Finalmente, la regulación energética, que proporciona incentivos a cómo y cuánta energía producir, y cómo y cuánto usarla, juega un papel decisivo

en este sentido. En este contexto, resulta prioritario diseñar políticas públicas integradas que aceleren la descarbonización sectorial. En particular, los sectores de energía, industria y transporte deben ser objeto de reformas ambiciosas en fiscalidad ambiental, regulación energética y planificación urbana. Por ejemplo, los incentivos a la electrificación deberían ir acompañados de una señal de precios robusta del carbono y de un marco normativo que promueva la movilidad sostenible, la eficiencia industrial y el autoconsumo energético. Además, se requiere una gobernanza coherente entre las escalas nacional, autonómica y local, coordinada con los compromisos del PNIEC 2023-2030 y la Estrategia de Largo Plazo 2050, así como con los marcos de actuación europeos recogidos en el paquete "Objetivo 55", la Ley Europea del Clima y la nueva propuesta de reducción del 90 por 100 de las emisiones para 2040. La década actual será, por tanto, determinante para convertir los compromisos climáticos en una transformación efectiva y justa del modelo energético y productivo español.

NOTAS

- (1) Firmado en la actualidad por 194 partes: 193 países y la Unión Europea.
- (2) Es razonable, sin embargo, que en algunos ámbitos se hable solamente de emisiones de CO₂ dado que estas representan el 98,5 por 100 del total de emisiones GEI para cualquiera de los años analizados, representando las emisiones de metano el 0,5 por 100 y las de óxido nitroso el 1 por 100. Si nos referimos a la producción de energía solamente, el 99,5 por 100 de las emisiones del sector son de CO₂.
- (3) La dinámica en los gráficos 1 y 2 es común en otros países de nuestro entorno, sobre todo en lo referente al período de fuerte expansión que sigue a la adopción del euro en 1999. Véase, por ejemplo, **Andreoni y Galmarini** (2012b) para Italia durante 1998-2006.
- (4) **Rivera-Niquepa** (2025) identifican para España seis períodos de manera endógena, usando contrastes de ruptura de la tendencia de las emisiones: 1995-2007, 2007-2009, 2009-2011, 2011-2013, 2013-2018 y 2018-2020.

- (5) Véase **Andreoni y Galmarini (2012b)** para el caso italiano, con resultados similares para 1995–2007.
- (6) **Andreoni y Galmarini (2016)** destacan el escaso crecimiento de la intensidad energética de Italia, Portugal y España, en relación con otros países europeos, durante 1995–2007.
- (7) Los pesos $\{\omega_{CO_2}^s, \omega_{CFE}^s\}_{s=1}^6$ se calculan con referencia a los totales (GEI y CFE) sectoriales, es decir, excluyendo la participación de los hogares. Para las ponderaciones del crecimiento del VAB real sectorial ω_{VAB}^s utilizamos los VAB sectoriales a precios corrientes. De este modo, tenemos en cuenta la variación en los precios relativos.
- (8) El “transporte por carretera” comprende las emisiones derivadas del uso de combustible en los vehículos de carretera, incluido el uso de vehículos agrícolas en carreteras y excluidas las emisiones del consumo militar.
- (9) Los sucesivos planes RENOVE, PREVER, PIVE, etc. incentivaron que el reemplazo fuese en favor de los vehículos con motores diésel.
- Atabaki, M. S., Bagheri, M. y Aryanpur, V. (2023).** Exploring the role of electrification and modal shift in decarbonizing the road passenger transport in British Columbia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, Article 103070. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103070>
- Davis, L. W., Fuchs, A. y Gertler, P. (2014).** Cash for Coolers: Evaluating a Large-Scale Appliance Replacement Program in Mexico. *American Economic Journal: Economic Policy*, 6(4), 207–238. <https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/pol.6.4.207>
- Díaz, A., Marrero, G. A., Puch, L. A. y Rodríguez-López, J. (2019).** Economic growth, energy intensity and the energy mix. *Energy Economics*, 81, 1056–1077. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.05.022>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2011).** *Greenhouse gas emissions from a typical passenger vehicle*. <http://www.epa.gov/otaq/climate/documents/420f14040a.pdf>
- Garage, C., Vega, A., McCann, B. y Cadden, T. (2025).** Assessment of the Impact of the Road Freight Modal Shift to Rail Freight on Ireland’s Carbon Emissions. *Transportation Research Procedia*, 86, 213–222. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2025.04.028>

BIBLIOGRAFÍA

- Alcántara, V. y Roca, J. (1995).** Energy and CO₂ emissions in Spain: methodology of analysis and some results for 1980–90. *Energy Economics*, 17(3), 221–230. [https://doi.org/10.1016/0140-9883\(95\)00014-L](https://doi.org/10.1016/0140-9883(95)00014-L)
- Andreoni, V. y Galmarini, S. (2012).** European CO₂ emission trends: A decomposition analysis for water and aviation transport sectors. *Energy*, 45(1), 595–602. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.07.039>
- Andreoni, V. y Galmarini, S. (2012b).** Decoupling economic growth from carbon dioxide emissions: A decomposition analysis of Italian energy consumption. *Energy*, 44(1) 682–691. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.05.024>
- Andreoni, V. y Galmarini, S. (2016).** Drivers in CO₂ emissions variation: A decomposition analysis for 33 world countries. *Energy*, 103, 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.096>
- González, R. M., Marrero, G. A., Rodríguez-López, J. y Marrero, A. S. (2019).** Analyzing CO₂ emissions from passenger cars in Europe: A dynamic panel data approach. *Energy Policy*, Volume 129. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.03.031>
- IEA. (2023).** *World Energy Outlook 2023*. International Energy Agency.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018).** *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021).** *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press.
- Jing, Q.-L., Liu, H.-Z., Yu, W.-Q. y He, X. (2022).** The Impact of Public Transportation on Carbon Emissions—From the Perspective of Energy Consumption. *Sustainability*, 14(10), 6248. <https://doi.org/10.3390/su14106248>

- Kaya, Y. y Yokoburi, K. (1997).** *Environment, energy, and economy : strategies for sustainability*. Tokyo [u.a.]: United Nations Univ. Press. ISBN 9280809113.
- Lorente-de-Las-Casas, A. y Marrero, G. A. (2025).** Impact of renewable energies on CO₂ emissions in the OECD. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 20(1), <https://doi.org/10.1080/15567249.2025.2517325>
- Marrero, Á. S., Marrero, G. A., Marina González, R. y Rodríguez-López, J. (2021).** Convergence in road transport CO₂ emissions in Europe. *Energy Economics*, Vol. 99, 105322. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105322>
- Marrero, G. A., Rodríguez-López, J. y González, R. M. (2020).** Car usage, CO₂ emissions and fuel taxes in Europe. *Series*, 11, 203-241. <https://doi.org/10.1007/s13209-019-00210-3>
- OCDE. (2021).** *Green Recovery Policies and COVID-19*. Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Ramírez-Díaz, A. J., Ramos-Real, F. J., Rodríguez-Brito, M. G., Rodríguez-Donate, M. C. y Lorente de las Casas, A. (2022).** Determining Factors of Consumers' Choice of Sport Utility Vehicles in an Isolated Energy System: How Can We Contribute to the Decarbonization of the Economy? *Energies*, 15(17), 6454. <https://doi.org/10.3390/en15176454>
- Rivera-Niquepa, J. D., Yusta, J. M. y De Oliveira-De Jesus, P. M. (2025).** Kaya factor decomposition assessment of energy-related carbon dioxide emissions in Spain: A multi-period and multi-sector approach. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 74, 104156. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104156>
- Santos, G. (2017).** Road fuel taxes in Europe: do they internalize road transport externalities? *Transport Policy*, 53, 120-134. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.09.009>
- Stern, N. (2007).** *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge University Press. ISBN: 978-0521700801.
- Tsemekidi Tzeiranaki, S., Economidou, M., Bertoldi, P., Thiel, C., Fontaras, G., Clementi, E. L. y Franco de los Ríos, C. (2023).** The impact of energy efficiency and decarbonisation policies on the European road transport sector. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 170, 103623. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103623>
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (UNFCCC). (2015).** Paris Agreement. Adoptado en la COP21, París, diciembre de 2015.

TEXTOS JURÍDICOS Y PLANES ESPECIALES

- Comunicación COM(2022)230 final. Plan REPowerEU.
- Comunicación COM(2024)63 final. Objetivo climático de la UE para 2040.
- Consejo Asesor Europeo sobre Cambio Climático (2023). Scientific Advice for the EU 2040 Target.
- Estrategia Española de Economía Circular 2030.
- Estrategia a Largo Plazo para una Economía Española Moderna, Competitiva y Climáticamente Neutra en 2050.
- Directiva (UE) 2018/850 relativa al Vertido de Residuos.
- Directiva (UE) 2023/959 Régimen para el Comercio de Derechos de Emisión de GEI Paquete legislativo "Fit for 55".
- Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2023-2030.
- Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR).
- Proyecto Estratégico para la Recuperación y Transformación Económica (PERTE) de Economía Circular.
- Reglamento (UE) 2018/1999 sobre la Gobernanza de la Unión de la Energía.
- Reglamento (UE) 2023/839 del Parlamento Europeo y del Consejo relativo a LULUCF.
- Reglamento (UE) 2021/1119. Ley Europea del Clima.
- Reglamento Delegado (UE) 2022/1214 (Taxonomía sostenible).

APÉNDICE A

FUENTES DE DATOS Y PESOS SECTORIALES

Las series de emisiones de GEI y de consumo final de energía (CFE) utilizadas para la descomposición de Kaya proceden del IEA (International Energy Agency) para el período 1990–2020.

Ambas series, GEI y CFE, ofrecen una clasificación sectorial de actividades económicas a 1 dígito (CNAE) o 2 dígitos (NACE Rev. 2), incluyendo también las emisiones y el consumo final de los hogares. Para compatibilizar las series del IEA con las demás bases de datos empleadas en este estudio, se han agregado estas actividades en seis sectores de acuerdo con el cuadro n.º A1, a los que se añade el sector hogares (descritos en detalle en la siguiente subsección). El cuadro n.º A1 mantiene además una desagregación específica de 2 dígitos en dos sectores clave: Energía (D35) y Transporte (H49–53), dada su relevancia en la evolución de las emisiones de GEI.

Como complemento, también se han utilizado las series de emisiones de GEI proporcionadas por el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, desde 1990 hasta 2023, última observación disponible. El INGEI ordena las emisiones según fuentes emisoras de GEI (ktCO₂). La división sectorial del INGEI es difícil de compatibilizar con la clasificación de actividades económicas del sistema de cuentas nacionales. Además, esta base de datos también estima los usos del suelo, la captura de CO₂ por cambios de usos del suelo y silvicultura (LULUCF, *Land Use, Land Use Change and Forestry*), que constituyen un sumidero de alivio del total emitido, por lo que no puede imputarse directamente a ningún sector productivo concreto. Las emisiones *netas* de GEI se definen como la diferencia entre las emisiones *brutas* y la captación LULUCF. Como veremos a continuación, las series agregadas de GEI en ambas

CUADRO N.º A1
CLASIFICACIÓN Y AGRUPACIÓN DE SECTORES DE ACTIVIDAD

S	CNAE	NACE2	SECTOR
1	A y B	1--9	Agricultura, pesca, minería
2	C y E	10--33 y 37--39	Manufacturas, agua (excepto energía D35)
3	D	35	Electricidad, gas, acondicionamiento de vapor y aire
4	F	41--43	Construcción, ingeniería civil
5	G y I--U	45--47 y 55--82	Servicios (excepto transporte H49--H53)
6	H	49--53	Transporte terrestre y transporte por gaseoductos

APÉNDICE A (continuación)

bases, IEA y INGEI, aunque tienen una clasificación sectorial distinta, sus niveles agregados tienen una dinámica muy parecida.

Las series de valor añadido bruto (VAB) sectorial (2 dígitos) proceden del Instituto Valenciano de Investigaciones Económicas (Ivие) para 1990-2024. Estas series están disponibles tanto a precios corrientes como constantes (euros de 2020), lo cual facilita el cálculo de pesos y tasas de crecimiento sectoriales. Los VAB

sectoriales se han expresado en términos relativos al VAB total mediante el correspondiente deflactor implícito.

Las series de población provienen del Instituto Nacional de Estadística (INE), utilizando la población residente por fecha, sexo y edad. Se ha considerado como población residente la correspondiente al 1 de julio de cada año, coherente con las prácticas estadísticas internacionales.

CUADRO N.º A2

PESOS SECTORIALES DE EMISIONES BRUTAS DE CO₂, CONSUMO FINAL ENERGÉTICO Y VAB

PESOS DE EMISIONES BRUTAS	1990-1994	1995-2007	2008-2014	2015-2019
Primario	0,026	0,026	0,028	0,032
Industria	0,267	0,235	0,225	0,229
Energía	0,341	0,354	0,331	0,299
Construcción	0,001	0,002	0,006	0,010
Servicios (excepto transporte)	0,022	0,024	0,030	0,035
Transporte	0,344	0,360	0,380	0,395
PESOS DE CONSUMO FINAL DE ENERGÍA	1990-1994	1995-2007	2008-2014	2015-2019
Primario	0,040	0,039	0,041	0,046
Industria	0,348	0,323	0,272	0,254
Energía	0,116	0,122	0,099	0,076
Construcción	0,002	0,004	0,012	0,016
Servicios (excepto transporte)	0,071	0,089	0,134	0,155
Transporte	0,423	0,423	0,441	0,454
PESOS DE VAB	1990-1994	1995-2007	2008-2014	2015-2019
Primario	0,052	0,042	0,029	0,032
Industria	0,193	0,175	0,132	0,131
Energía	0,025	0,019	0,025	0,024
Construcción	0,097	0,105	0,083	0,061
Servicios (excepto transporte)	0,582	0,611	0,687	0,705
Transporte	0,050	0,047	0,044	0,046

APÉNDICE B

CUADRO N.º B1
CONTRIBUCIÓN SECTORIAL AL CRECIMIENTO DE EMISIONES BRUTAS

CONTRIBUCIÓN A LA INT. CARBONO	1990-1994	1995-2007	2008-2014	2015-2019
Primario	0,0	0,0	0,0	0,0
Industria	0,2	-0,5	0,6	0,2
Energía	0,0	1,4	-1,4	-1,1
Construcción	0,0	0,0	0,0	0,0
Servicios(excepto transporte)	-0,2	-0,4	0,1	-0,4
Transporte	-0,3	-0,2	0,1	-0,3
Int. carbono = CO₂/CFE (suma)	-0,4	0,2	-0,6	-1,6
CONTRIBUCIÓN A LA INT. ENERGÉTICA	1990-1994	1995-2007	2008-2014	2015-2019
Primario	0,3	0,1	0,1	-0,1
Industria	0,6	0,5	-1,2	-0,1
Energía	0,3	0,4	-0,8	0,1
Construcción	0,2	-0,6	1,2	-0,2
Servicios(excepto transporte)	-2,0	-1,9	-0,4	-1,4
Transporte	1,1	1,5	-2,0	1,3
Int. energética = CFE/VAB (suma)	0,5	0,0	-3,2	-0,5
CONTRIBUCIÓN AL VAB P. C.	1990-1994	1995-2007	2008-2014	2015-2019
Primario	-0,2	0,0	-0,1	0,1
Industria	-0,7	0,2	-0,4	0,3
Energía	0,1	0,0	0,1	0,0
Construcción	-0,2	0,5	-0,9	0,3
Servicios(excepto transporte)	2,1	1,8	0,2	1,7
Transporte	0,1	0,0	0,0	0,1
VAB p. c. = VAB/Pob. (suma)	1,2	2,5	-1,1	2,5