



**DESACOPLAMIENTO Y DESMATERIALIZACIÓN: ANÁLISIS DE LA
INFLUENCIA DEL CRECIMIENTO ECONÓMICO SOBRE LAS EMISIONES
DE CO₂ Y EL USO DE MATERIALES EN LOS PAÍSES DE INGRESO ALTO
(1970-2021).**

DECOUPLING AND DEMATERIALIZATION: ANALYSIS OF THE INFLUENCE
OF ECONOMIC GROWTH ON CO₂ EMISSIONS AND THE USE OF MATERIALS
IN HIGH-INCOME COUNTRIES (1970-2021).

MÁSTER UNIVERSITARIO DE ANÁLISIS ECONÓMICO

AUTOR: CRISTIAN MOGO CASTRO

EMAIL: cmogo@uoc.edu

TUTOR: FRANCISCO JOSÉ GONZÁLEZ GÓMEZ

CURSO 2023-2024, 2º SEMESTRE

FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	Desacoplamiento y desmaterialización: análisis de la influencia del crecimiento económico sobre las emisiones de CO ₂ y el uso de materiales en los países de ingreso alto (1970-2021).
Nombre del autor/a:	Cristian Mogo Castro
Nombre del tutor/a:	Francisco José González Gómez
<p>¿Cuál o cuáles ODS (máximo dos) consideras que están más vinculados con tu trabajo? (Objetivos de Desarrollo Sostenible PNUD (undp.org))</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. ODS 12 - Producción y Consumo Responsables: El trabajo se centra en la relación entre el crecimiento económico y la degradación ambiental, y examina cómo los países pueden equilibrar el crecimiento económico con la preservación del medio ambiente. Esto está directamente relacionado con el ODS 12, que busca garantizar patrones de consumo y producción sostenibles. 2. ODS 13 - Acción por el Clima: El estudio también aborda el tema de las emisiones de CO₂ y el consumo de materiales, que son un factor clave en el cambio climático. Por lo tanto también está vinculado con el ODS 13, que insta a tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus impactos.
Resumen del trabajo (máximo 250 palabras):	
<p>Este trabajo explora la interacción entre el crecimiento económico y la degradación ambiental, utilizando herramientas analíticas como el índice de desacoplamiento de Tapio, la elasticidad ecológica y la Curva Ambiental de Kuznets. El estudio se centra en la hipótesis de que el crecimiento económico en los países de ingreso alto no se ha traducido en un desacoplamiento absoluto respecto a la degradación ambiental. A través de un análisis detallado, se examina si algunos países han logrado un desacoplamiento fuerte entre el crecimiento del PIB y las emisiones de CO₂, y cómo este fenómeno es menos común cuando se considera el consumo de materiales y cuando se introduce la perspectiva basada en el consumo frente a la territorial. Además, se aborda el papel de la deslocalización de la producción en la externalización de emisiones y cómo esto se refleja en la reducción de la carga</p>	

ecológica de un país. Este estudio tiene como objetivo contribuir al debate sobre cómo los países pueden equilibrar el crecimiento económico con la preservación del medio ambiente, ofreciendo insights valiosos para formuladores de políticas, investigadores y partes interesadas en la sostenibilidad global.

Abstract (in English, 250 words maximum):

This work explores the interaction between economic growth and environmental degradation, using analytical tools such as the Tapio decoupling index, ecological elasticity, and the Environmental Kuznets Curve. The study focuses on the hypothesis that economic growth in high-income countries has not resulted in absolute decoupling from environmental degradation. Through a detailed analysis, it examines whether some countries have achieved strong decoupling between GDP growth and CO₂ emissions, and how this phenomenon is less common when considering material consumption and when introducing the perspective based on consumption versus the territorial one. In addition, it addresses the role of production delocalization in the externalization of emissions and how this is reflected in the reduction of a country's ecological burden. This study aims to contribute to the debate on how countries can balance economic growth with environmental preservation, offering valuable insights for policymakers, researchers, and stakeholders in global sustainability.

Palabras clave (entre 4 y 8):

Desacoplamiento, desmaterialización, degradación ambiental, crecimiento económico, consumo de materiales, emisiones de CO₂, elasticidad ecológica, Curva Ambiental de Kuznets.

Índice

1. Introducción.....	6
2. Marco teórico.....	7
2.1. Desacoplamiento y desmaterialización.....	7
2.2. La literatura sobre el desacoplamiento y la desmaterialización.....	10
2.3. La paradoja de Jevons y la Curva Ambiental de Kuznets.....	13
2.3.1. Paradoja de Jevons	13
2.3.2. Curva Ambiental de Kuznets.....	15
3. Metodología.....	18
3.1. Datos	18
3.2. Índice de desacoplamiento.....	19
3.3. STIRPAT: Elasticidad ecológica	22
3.4. Curva Ambiental de Kuznets	24
4. Resultados y discusión	27
4.1. Índice de desacoplamiento de Tapio	27
4.2. STIRPAT: Elasticidad ecológica.	31
4.3. Curva Ambiental de Kuznets.	37
5. Conclusiones.....	40
6. Bibliografía.....	43
7. Anexo.....	56

Índice de Figuras

Figura 1. Tipos de desacoplamiento.	8
Figura 2. La paradoja de Jevons.	14
Figura 3. La economía como subsistema abierto.	15
Figura 4. La Curva Ambiental de Kuznets.	16
Figura 5. Tasa de variación del PIB, el CO ₂ territorial (CO ₂ t), el CO ₂ basado en el consumo (CO ₂ c), el consumo material doméstico (CMD) y la huella material (HM)...	27

Índice de tablas

Tabla 1. Variables empleadas.....	19
Tabla 1. Categorías de desacoplamiento.....	21
Tabla 2. Categorías de Elasticidad Ecológica.....	23
Tabla 3. Interpretaciones de la curva CAK.....	26
Tabla 5. Resultados del índice de desacoplamiento de Tapio para las emisiones de CO ₂ territorial (CO _{2t}) y CO ₂ basado en el consumo (CO _{2c}).....	28
Tabla 6. Resultados del índice de desacoplamiento de Tapio para el Consumo Material Doméstico (CMD) y la Huella Material (HM).....	30
Tabla 7. Resultados para la elasticidad ecológica de las emisiones de CO ₂ territorial en el período 1970-2021.....	32
Tabla 8. Resultados para la elasticidad ecológica de las emisiones de CO ₂ basadas en el consumo.....	33
Tabla 9. Resultados para la elasticidad ecológica del Consumo Material Doméstico. ..	34
Tabla 10. Resultados para la elasticidad ecológica de la Huella Material.....	35
Tabla 11. Resultados del modelo (8) para las emisiones de CO ₂ territorial.	37
Tabla 12. Resultados del modelo (8) para las emisiones de CO ₂ basadas en el consumo.	38
Tabla 13. Resultados del modelo (8) para el Consumo Material Doméstico.	38
Tabla 14. Resultados del modelo (8) para la Huella Material.	39
Tabla 15. Resultados del índice de desacoplamiento de Tapio para las emisiones de CO ₂ territorial con tres subperíodos.	56
Tabla 16. Resultados del índice de desacoplamiento de Tapio para las emisiones de CO ₂ basadas en el consumo con tres subperíodos.....	56
Tabla 17. Resultados del índice de desacoplamiento de Tapio para el consumo material doméstico con tres subperíodos.....	57
Tabla 18. Resultados del índice de desacoplamiento de Tapio para la huella material con tres subperíodos.	58
Tabla 19. Resultados para la elasticidad ecológica de las emisiones de CO ₂ territorial con tres subperíodos.	59
Tabla 20. Resultados para elasticidad ecológica de las emisiones de CO ₂ basadas en el consumo tres subperíodos.....	60
Tabla 21. Resultados para la elasticidad ecológica del consumo material doméstico con tres subperíodos.	61
Tabla 22. Resultados para la elasticidad ecológica de la huella material con tres subperíodos.....	62

1. Introducción

Desde la publicación del informe “The Limits to Growth” (Meadows, Meadows, Randers, & Behrens, 1972) hemos asistido a un intenso debate entre los académicos que postulan que el crecimiento económico continuo e ilimitado es imposible dentro de un planeta finito y los que defienden que la virtuosa combinación de ingenio humano e innovación tecnológica hará posible quebrantar cualquier límite biofísico. En este proceso la noción de *crecimiento sostenible*, también nombrada en ocasiones como *crecimiento verde*, ha tomado protagonismo, planteando la necesidad de conciliar el crecimiento económico y la sostenibilidad medioambiental. Esta necesidad de concebir un modo de compatibilizar la expansión de la actividad económica y el respeto de los límites planetarios ha llevado a postular la posibilidad de desvincular el PIB de los impactos ambientales, de modo que la continua expansión de la economía se desarrolle sin que ello derive en una mayor degradación ambiental.

En el contexto de un creciente reconocimiento de la necesidad de un desarrollo sostenible, este trabajo se propone explorar la interacción entre el crecimiento económico y la degradación ambiental a través de herramientas analíticas como el índice de desacoplamiento de Tapio, la elasticidad ecológica y la Curva Ambiental de Kuznets (CAK). En particular, se centra en la cuestión de si el crecimiento económico en los países de ingreso alto ha logrado desacoplarse de las emisiones de CO₂ y el consumo de materiales, es decir, si ha sido posible expandir la economía sin aumentar estos impactos ambientales.

La hipótesis principal de este estudio es que el crecimiento económico en los países de ingreso alto no se ha traducido en una tendencia generalizada de desacoplamiento absoluto respecto a las emisiones de CO₂ y el consumo de materiales. Además, se plantean dos hipótesis secundarias. La primera, que la utilización de fuentes de energía renovable se asocia con una reducción de las emisiones de CO₂ y a un menor uso de materiales. La segunda, que la disminución del consumo de combustibles fósiles se relaciona con una menor cantidad de emisiones de CO₂ y un menor uso de materiales.

Para investigar estas hipótesis, se especifican dos preguntas de investigación:

1. ¿Ha logrado el crecimiento económico, en los países de ingreso alto, desacoplarse completamente de las emisiones de CO₂ y el consumo de materiales?
2. ¿Un uso de fuentes de energía renovable y un menor consumo de combustibles es determinante para lograr un desacoplamiento absoluto entre el crecimiento económico y la degradación ambiental?

Este estudio se basa en un análisis detallado de datos de varios países de ingresos altos, utilizando herramientas analíticas avanzadas para explorar las complejidades de la relación entre el crecimiento económico y la degradación ambiental. Se presta especial atención a la forma en que las políticas y prácticas en torno al uso de energía renovable y el consumo de combustibles fósiles pueden influir en esta relación.

Además, este trabajo también examina el papel de la deslocalización de la producción en la externalización de emisiones y cómo esto se refleja en la reducción de la carga ecológica de un país. Este aspecto es especialmente relevante en el caso de países que son grandes exportadores de minerales y combustibles fósiles.

Finalmente, se aborda la forma de la Curva Ambiental de Kuznets (CAK) y su relación con la elasticidad ecológica. Se discute cómo la CAK tiende hacia una forma de U invertida en el caso de las emisiones de CO₂ territorial y en forma de N para el consumo material doméstico y la huella material, reforzando la hipótesis de que no existe una tendencia generalizada entre los países de ingreso alto que los encamine inevitablemente hacia el desacoplamiento absoluto.

Este estudio tiene como objetivo contribuir al debate sobre cómo los países pueden equilibrar el crecimiento económico con la preservación del medio ambiente, ofreciendo insights valiosos para formuladores de políticas, investigadores y partes interesadas en la sostenibilidad global. A través de este trabajo, esperamos arrojar luz sobre las complejas relaciones entre el crecimiento económico, el consumo de energía y el impacto ambiental, y subrayar la necesidad de políticas que fomenten la innovación en tecnologías limpias y la eficiencia en el uso de recursos.

En última instancia, este trabajo busca proporcionar una base sólida para futuras investigaciones en este campo y para el desarrollo de políticas efectivas que puedan ayudar a los países a navegar el delicado equilibrio entre el crecimiento económico y la sostenibilidad ambiental.

2. Marco teórico

2.1. Desacoplamiento y desmaterialización

En términos generales, en la literatura académica se entiende el desacoplamiento y la desmaterialización como aquella situación en la que el crecimiento económico se disocia de la degradación ambiental. Es decir, que mientras el ingreso aumenta, los impactos ambientales disminuyen. Así, si bien se pueden dar situaciones intermedias, en las que los impactos ambientales valorados se desacoplan parcialmente del desarrollo económico,

creciendo, por tanto, a un ritmo inferior, la consideración de una situación disociativa de estas características plantea la necesidad de que el desacoplamiento sea absoluto (Parrique, et al., 2019; Vogel & Hickel, 2023). Esto supone que el simple hecho de que el ingreso crezca a una mayor velocidad de lo que lo hace la degradación ambiental no es suficiente para considerar la existencia de una situación de desacoplamiento o desmaterialización, pues lo que se está definiendo es el fin de la correlación entre el crecimiento económico y la reducción de la calidad ambiental (IRP, 2017), lo cual exige que la degradación ambiental tome una tendencia sostenida de reducción.

Por tanto, esta forma de considerar el desacoplamiento y la desmaterialización, desechando las disociaciones relativas o débiles, se justifica en el hecho de que, en dichos escenarios, el aumento de la producción deriva en un mayor uso de materiales y en mayores niveles de emisiones que no logran ser compensados por la disminución de la intensidad del impacto generado por cada unidad en que se incrementa el ingreso. Es decir, si bien por cada dólar que se expande la economía la degradación ambiental aumenta a un ritmo inferior, el mayor volumen que toma la producción se traduce en una cantidad absoluta de emisiones o de uso de materiales superior.

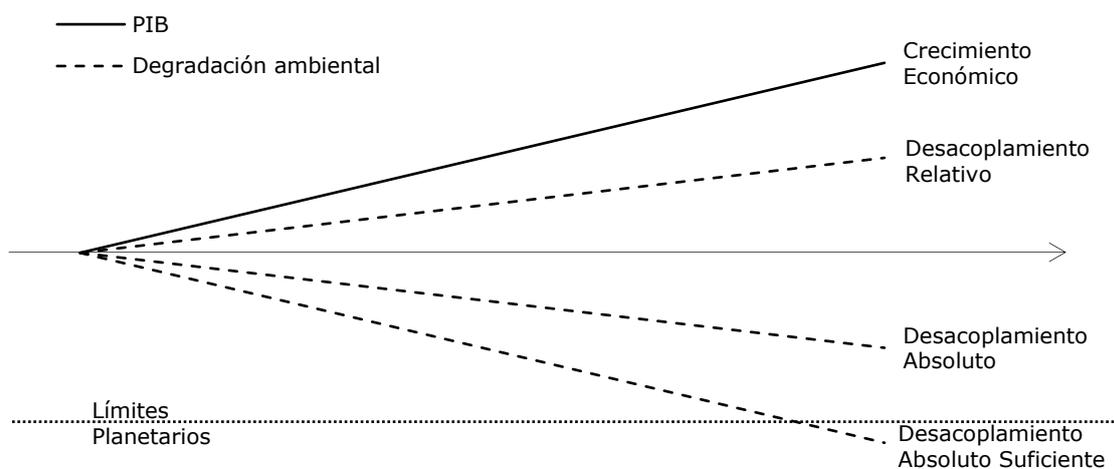


Figura 1. Tipos de desacoplamiento.

Fuente: adaptado de Raworth (2018).

En este sentido, el concepto de degradación ambiental se refiere a todos los efectos degenerativos que la actividad económica causa sobre la naturaleza. Así, siguiendo la distinción establecida por el PNUMA (UNEP, 2011b), se distingue entre el uso de recursos y los impactos ambientales.

En el caso del desacoplamiento de recursos o desmaterialización, nos referimos a una situación en la que la cantidad de recursos extraídos de la naturaleza disminuye en un contexto de expansión de la actividad económica agregada, como consecuencia, por

ejemplo, de la promoción estrategias de economía circular (Hailemariam & Erdiaw-Kwasie, 2022), de mejoras de eficiencia (Schandl, et al., 2016), de un mayor reciclaje de materiales (Mazzanti & Zoboli, 2008), o de un aumento de actividades menos intensivas en el uso de materias primas (Kovacic, Spanò, Lo Piano, & Sorman, 2018). Es decir, un escenario en el que con una menor cantidad de insumos materiales se obtiene una producción igual o mayor en términos monetarios (Parrique, et al., 2019) Por su parte, el desacoplamiento de los impactos ambientales hace referencia a la situación en la que el incremento de la actividad económica agregada se produce mientras que el impacto ambiental disminuye, por ejemplo, como consecuencia de la implementación fuentes de energía renovable (Menegaki, 2011) o de la tercerización de la economía (Fix, 2019; Heiskanen & Jalas, 2000).

Generalmente, estas dos dimensiones de la degradación ambiental mantienen una profunda interrelación, de modo que, por ejemplo, la extracción y uso de materiales supone, debido a la necesidad de utilizar combustibles fósiles en los diferentes procesos, la generación de emisiones de CO₂.

Además, la apreciación de una situación de desacoplamiento o desmaterialización requiere tener en cuenta una dimensión temporal, pues la mitigación de la degradación ambiental no sólo exige una disociación absoluta respecto a la expansión de la economía, sino que implica que esta disociación se mantenga de manera continuada y permanente en el tiempo (Hickel & Kallis, 2020; Parrique, et al., 2019). Este aspecto es relevante, pues del mismo modo que se puede producir la desvinculación entre ambos indicadores durante un periodo temporal concreto, como consecuencia, por ejemplo, de una crisis económica o de un cambio a gran escala de las fuentes de energía empleadas, puede producirse, a continuación, un reacoplamiento. De este modo, carecería de sentido asumir como desacoplamiento situaciones de mera desvinculación temporal entre el crecimiento económico y la degradación ambiental, en los cuales tras una intensa reducción de los impactos ecológicos se retorna a una senda de rebasamiento continuado de los límites biofísicos del planeta.

Con todo esto, nos situamos en la línea de lo establecido por el Programa Ambiental de las Naciones Unidas, que delimita la economía verde o sostenible como aquella reduce tanto sus impactos ambientales como su uso de recursos, siendo, a su vez, inclusiva (UNEP, 2011a). Esto es, una economía que maximiza el bienestar y la equidad social en un contexto en el que reduce la degradación medioambiental.

2.2. La literatura sobre el desacoplamiento y la desmaterialización

En la década de 1990 varios estudios empíricos (Grossman & Krueger, 1991; Grossman & Krueger, 1995; Panayotou, 1993; Shafik & Bandyopadhyay, 1992) mostraron que la relación los impactos ambientales y el crecimiento económico se comportaba de tal forma que seguía una tendencia de U invertida (Parrique, et al., 2019), es decir, que tras un periodo inicial de crecimiento comenzaba a disminuir tras alcanzar el punto de inflexión. Estas apreciaciones condujeron a que este hecho se definiese como Curva Ambiental de Kuznets (CAK), comenzando a calificar estas situaciones como desacoplamiento o desmaterialización.

Esta hipótesis, que asume esta desvinculación como algo natural, ha tenido repercusiones mucho más allá del ámbito puramente académico, pues la suposición de que el crecimiento económico es aquello que permite que un país pueda reducir sus impactos ambientales ha orientado la dirección de los acuerdos y políticas de mitigación adoptadas. Así, por ejemplo, desde 2001 la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) ha establecido oficialmente el desacoplamiento como el objetivo principal para la consecución del crecimiento verde (OECD, 2002). Una senda seguida, también, por la Comisión Europea que estableció como horizonte un crecimiento económico desvinculado de la degradación ambiental (EU Commission, 2001). Este objetivo de promover un modelo de economía cuya expansión no dañe los ecosistemas en los que está inscrita, se ha ido repitiendo no sólo en las estrategias y programas adoptados por la OCDE y la Comisión Europea, sino también de otras instituciones como las Naciones Unidas, a través de su Estrategia del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) (UNEP, 2011a), o el Banco Mundial (World Bank, 2012), para las cuales la disociación entre crecimiento de la economía e impactos ambientales degenerativos se configura como objetivo central en sus estrategias de promoción de un *crecimiento verde*. Lo cual ha llevado a que el desacoplamiento se haya establecido como uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) impulsados por las Naciones Unidas.

Sin embargo, desde principios de la década pasada, esta teoría del desacoplamiento entendido como fenómeno que se produce automáticamente al alcanzar un cierto grado de desarrollo económico ha perdido relevancia, ya que nuevos estudios han permitido observar que el desacoplamiento es resultado de la implementación políticas específicas que generan cambios en la estructura del sistema económico (Smith, Hargreaves, & Desha, 2010; UNEP, 2014). Esto ha otorgado una nueva dimensión a la comprensión del fenómeno de disociación entre expansión de la economía y la degradación ambiental, dejando de ser entendido como hecho natural del desarrollo económico, que deviene

automáticamente al alcanzar un cierto umbral, para ser concebido como el resultado de la intervención institucional, que orienta las políticas económicas, energéticas o medioambientales en base al objetivo del crecimiento sostenible.

En términos de uso de materiales la evidencia empírica señala claramente que el desacoplamiento absoluto no se ha producido, de modo que el crecimiento económico trae consigo una mayor extracción de recursos (Papież, Śmiech, Fródyrna, & Borowiec, 2022). Algunos de los estudios señalan que a escala global no se observa desacoplamiento absoluto (Cibulka & Giljum, 2020; Haberl, et al., 2020; Hickel & Kallis, 2020; Lenzen, et al., 2022; Schandl, et al., 2016; Wiedmann, Schandl, Lenzen, & Kanemoto, 2015; Wood, et al., 2018), otros advierten evidencia de desacoplamiento a nivel nacional (Steinberger, Krausmann, Getzner, & West, 2013; Wang, Hashimoto, Yue, Moriguchi, & Lu, 2013) y una mayoría señalan la existencia de un desacoplamiento de carácter relativo (Bithas & Kalimeris, 2018; Krausmann, Schandl, Eisenmenger, Giljum, & Jackson, 2017; Martinicio-Perez, Schandl, Fishman, & Tanikawa, 2018).

En otros trabajos se sostiene que la existencia de desacoplamiento absoluto está vinculada al nivel de desarrollo económico, de la forma en que se midan los recursos utilizados, de la estructura del modelo productivo y del desarrollo de la tecnología (Fródyrna, Papież, & Śmiech, 2020; Lenzen, et al., 2022; Wang, Zhao, Wei, Yue, & Du, 2018; Wang & Wang, 2019; Wiedmann, Schandl, Lenzen, & Kanemoto, 2015; Wu, et al., 2019). Por su parte, otros estudios muestran que, a nivel nacional, la disminución en el uso de materiales está vinculada, principalmente, a los periodos de recesión o ralentización de la economía (Shao, Schaffartzik, Mayer, & Krausmann, 2017), teniendo una especial importancia esta dinámica en los países de altos ingresos (Steinberger, Krausmann, Getzner, & West, 2013). Algunos autores llegan incluso a sostener que todo proceso de desmaterialización global coincide con periodos de recesión económica (Krausmann, et al., 2009).

A pesar de que la economía mundial siguió una senda de desmaterialización desde mediados del siglo pasado, esta dinámica se ha visto interrumpida durante las dos últimas décadas (Bithas & Kalimeris, 2018; Krausmann, Lauk, Haas, & Wiedenhofer, 2018). Este proceso es definido como rematerialización, es decir, como un incremento en la extracción de materiales para abastecer la economía mundial (Giljum, Dittrich, Lieber, & Lutter, 2014). Así, en un principio, en los países de ingreso alto se puede observar un desacoplamiento relativo cuando sólo se tiene en cuenta el uso de materiales en términos de producción, pero cuando se toma en cuenta el consumo, es decir, la deslocalización del suministro de materias primas, el desacoplamiento se desvanece (Bithas & Kalimeris, 2018; Wang, Zhao, Wei, Yue, & Du, 2018; Wiedmann, Schandl, Lenzen, & Kanemoto, 2015).

Por su parte, en el caso de las emisiones de CO₂ la mayor parte de la literatura identifica una dinámica de desacoplamiento relativo (Longhofer & Jorgenson, 2017; Parrique, et al., 2019; Sarkodie & Strezov, 2019; Stern, Gerlagh, & Burke, 2017; Vollebergh, Melenberg, & Dijkgraaf, 2009). Algunos autores, partiendo de indicadores basados en la producción y por periodos temporales cortos, han observado casos de desacoplamiento absoluto (Azam & Khan, 2016; Chen, Wang, Cui, Shuo, & Song, 2018; Madaleno & Mountinho, 2018; Roinioti & Koroneos, 2017), pero estas reducciones son generalmente consideradas como insuficientes (Parrique, et al., 2019).

En este sentido, la mayoría de los estudios que han examinado la existencia de una CAK para el caso de las emisiones de CO₂ no encuentran evidencia de desacoplamiento absoluto (Koirala, Li, & Berrens, 2011; Li, Berrens, & Grijalva, 2007; Mardani, Streimikiene, Cavallaro, Loganathan, & Khoshnoudi, 2019). En aquellos en los que si se ha reportado una disociación entre el PIB y las emisiones se analiza un marco temporal reducido o una zona geográfica determinada (Chen, Wang, Cui, Shuo, & Song, 2018; EEA, 2018; Madaleno & Mountinho, 2018; Roinioti & Koroneos, 2017). Cuando se analizan áreas geográficas restringidas y no se imputan las emisiones basadas en el consumo es más sencillo observar un desacoplamiento absoluto, sin embargo, la disociación que se reporta es mínima (Azam & Khan, 2016; Lean & Smyth, 2010; Van Caneghem, Block, Cramm, Mortier, & Vandecasteele, 2010). Además, cuando se incorporan las emisiones basadas en el consumo, el desacoplamiento absoluto desaparece, observándose generalmente una disociación relativa (Cohen, Jalles, Loungani, & Marto, 2018; Hardt, et al., 2018; Jiborn, Kander, Kulionis, Nielsen, & Moran, 2018; Schröder & Storm, 2020; Schulz, 2010; van den Lindt, et al., 2017).

Otro aspecto que se resalta en varios estudios es el efecto de las recesiones económicas, que por su efecto sobre las actividades económicas tienen una influencia determinante sobre las emisiones. Así, la contracción de la economía puede impulsar una reducción notable de los impactos ambientales (Declercq, Delarue, & D'haeseleer, 2011; Feng, Davis, Sun, & Huabacek, 2015; Roinioti & Koroneos, 2017), pero dicha reducción no tiene ninguna relación con las políticas de mitigación adoptadas en términos de disociación entre la economía y la degradación ambiental, sino que es derivada de una ralentización de la producción y el consumo.

Por último, algunos estudios (Azam & Khan, 2016; Hardt, et al., 2018; Kander, Jiborn, Moran, & Wiedmann, 2015; Moreau, Neves, & Vuille, 2019; Moreau & Vuille, 2018; Peters & Hertwich, 2008; Wood, et al., 2020) otorgan especial relevancia al papel de los procesos de deslocalización productiva, que transfiere emisiones a terceros países, y a transformaciones en la estructura económica nacional, principalmente a través de la

sustitución de actividades industriales por actividades del sector servicios. Además, algunos autores también señalan la incidencia de las diferentes etapas de despliegue de las energías renovables y los cambios que este hecho ha provocado sobre la composición del abastecimiento de energía primaria (Chen & Hu, 2007; Fang, 2011; Menegaki, 2011; Salim & Rafiq, 2012; Tiwari, 2011; Tugcu, Ozturk, & Aslan, 2012; Yao, Zhang, & Zhang, 2019).

2.3. La paradoja de Jevons y la Curva Ambiental de Kuznets

Como se puede advertir, la literatura académica no ha llegado a un consenso claro sobre la incidencia y la magnitud de los procesos de desacoplamiento y desmaterialización. En este contexto, nos encontramos con dos hipótesis recurrentes dentro del debate de este campo: la paradoja de Jevons (Alcott, 2005; Herring, 2006; Herring & Roy, 2007; Jevons, 1865; Khazzoom, 1980; Polimeni, Mayumi, Giampietro, & Alcott, 2008; Sorrell, Dimitropoulos, & Sommerville, 2009) y la Curva Ambiental de Kuznets (Agras, 1995; Auty, 1985; Dinda, 2004; Grossman & Krueger, 1991; Grossman & Krueger, 1995; Holtz-Ekain & Selden, 1995; Panayotou, 1993; Shafik & Bandyopadhyay, 1992).

2.3.1. Paradoja de Jevons

Generalmente, la mejora de la eficiencia en el uso de los recursos es considerada como la estrategia por antonomasia a la hora de conseguir desacoplar la expansión económica de la degradación ambiental. Sin embargo, frecuentemente, este ahorro generado por la consecución de técnicas y procesos más eficientes se traduce en un efecto rebote. Así, como describe la paradoja de Jevons (1865), las mejoras de eficiencia se traducen, de manera indirecta, en un incremento absoluto del uso del recurso implicado. Esto debe a que las mejoras de eficiencia no se utilizan para producir la misma cantidad en menos tiempo, sino para producir más unidades en el mismo lapso temporal, ya que la reducción del costo por unidad de producto provoca que este tenga un precio más económico, impulsando la demanda y, por ende, incrementando el consumo total. Si el imperativo de toda economía es la necesidad de lograr su crecimiento continuo, toda mejora de eficiencia tendrá como correlato el incremento de la producción y, por ende, del consumo.

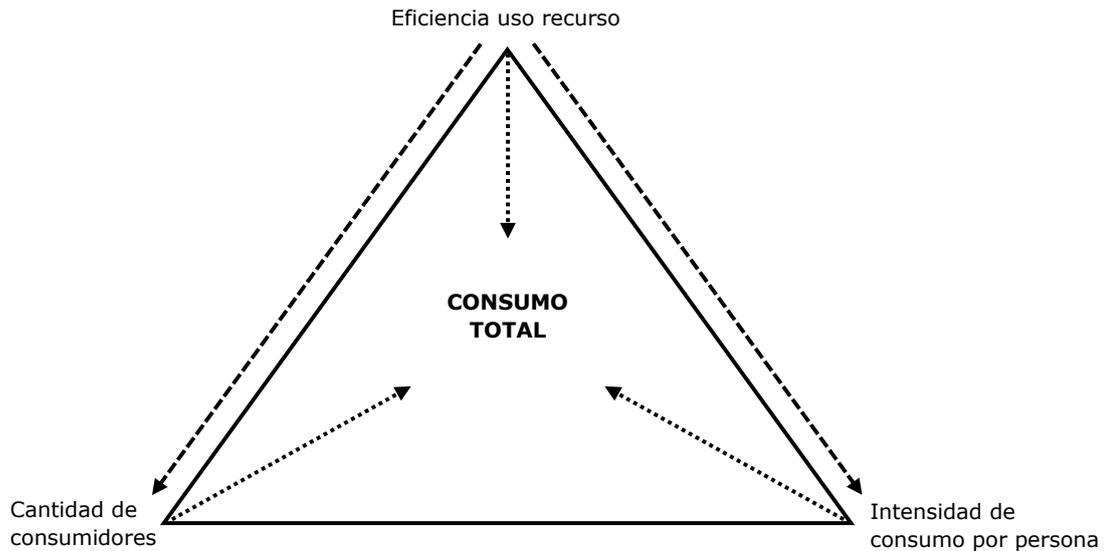


Figura 2. La paradoja de Jevons.

Fuente: elaboración propia.

Estos efectos rebote pueden darse, principalmente, de tres formas (Greening, Greene, & Difiglio, 2000): 1) directo, cuando la ganancia de eficiencia de un recurso se invierte en un consumo adicional de ese mismo recurso, especialmente habitual en el caso de los bienes de uso común; 2) indirecto, que se produce cuando el recurso se reasigna a otro tipo de consumo; 3) macroeconómico, en cuyo caso los avances de eficiencia reportan una mayor utilización generalizada de dicho recurso, siendo esto el resultado del incremento de la capacidad social de explotar los recursos físicamente disponibles.

Esta lectura de los efectos rebote parte de la consideración del sistema económico como un sistema abierto, cuya reproducción depende de las relaciones que establece con el sistema ecológico. La conclusión lógica que deriva de esta concepción es que los flujos monetarios sobre los que se construye el paradigma económico actual solo pueden reproducirse gracias a los flujos de materialidad biofísica provistos por el sistema ecológico (Amado & Sauer, 2012). Este es uno de los principales puntos de divergencia entre los economistas ecológicos y los de la escuela neoclásica, puesto que mientras que los primeros consideran que existe una perfecta sustituibilidad entre el capital natural y el manufacturado, los segundos inciden en la imposibilidad de replicar y sustituir determinadas funciones ecosistémicas (Naredo, 2015 [1987]).

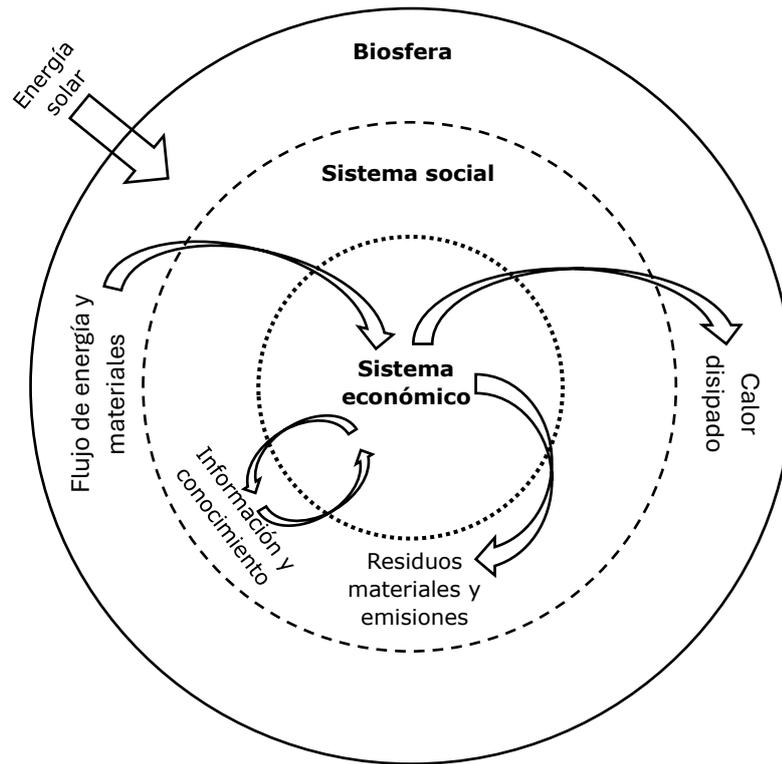


Figura 3. La economía como subsistema abierto.

Fuente: adaptado de Raworth (2018).

2.3.2. Curva Ambiental de Kuznets

Por su parte, la hipótesis de la CAK plantea en las primeras etapas del desarrollo económico, impulsadas por una producción industrial intensiva en el uso de recursos, la degradación ambiental aumenta a la par que los ingresos. Sin embargo, alcanzado un cierto punto en el desarrollo económico la tendencia se invierte, de modo que cada unidad adicional en que se incrementan los ingresos supone una disminución de la degradación ambiental. Esto se debe a que una vez que se ha alcanzado un cierto umbral de ingresos, los costos laborales se incrementan por encima de la productividad, llevando a que las industrias se deslocalicen hacia regiones menos desarrolladas y con una abundante mano de obra barata. Hecho que provoca que el peso del sector servicios, con un menor impacto ambiental, se incremente en relación con el sector industrial. Como especifican algunos autores (Ayres & van den Bergh, 2005; Cogoy, 2004; Warr & Ayres, 2012) el desacoplamiento puede verse reforzado por la creación de valor en el sector servicios en un contexto en el que la demanda de estos se incrementa por encima de la de los bienes físicos y la productividad laboral crece a través de la acumulación de capital humano, que es menos dependiente de los recursos materiales. Además, alcanzar un mayor nivel de ingresos permite a las naciones desarrolladas implementar medidas que contribuyan a

mitigar su impacto ambiental, como puede ser el caso de las energías renovables, que requieren importantes inversiones. De este modo, si se asume como cierta esta hipótesis, el crecimiento económico, en lugar de ser uno de los factores causantes de la degradación ambiental, sería la condición necesaria para reducir los impactos sobre el medioambiente.

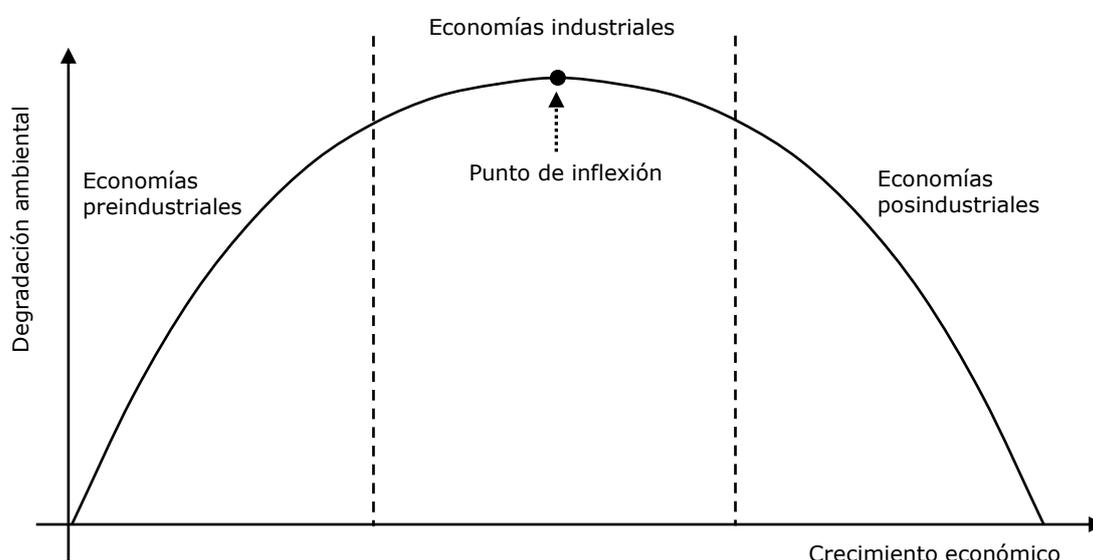


Figura 4. La Curva Ambiental de Kuznets.

Fuente: adaptado de Panayotou (1993).

En este sentido, una parte de la literatura (Arrow, et al., 1995) interpreta la CAK como el reflejo de una realidad inherente al devenir natural del desarrollo económico, fruto de un proceso que fluctúa desde las menos contaminantes economías agrarias a las economías industrializadas, intensivas en uso de recursos y emisiones, desembocando en unas economías de servicios, de nuevo, más sostenibles. Sin embargo, otra parte de la literatura (Suri & Chapman, 1998), plantea la posibilidad de que la deslocalización de los procesos productivos más contaminantes de la cadena de suministro, desde países con economías desarrolladas hacia países con economías emergentes, sea la causa que facilita la presencia de este mecanismo. En esta circunstancia, en la que el tramo de la curva que indica una asociación inversa entre la degradación ambiental y un mayor nivel de ingresos se debe a la deslocalización productiva, no es posible desarrollar un proceso de desacoplamiento ilimitadamente, ya que, llegado cierto punto de saturación, los países con menos recursos no contarán con naciones aún más desfavorecidas a las cuales exportar sus actividades contaminantes.

Esta misma línea es la seguida por la teoría comercial de Hecksher-Ohlin (Heckscher, 1919; Ohlin, 1971), que argumenta que, en condiciones de un comercio globalizado, los países desarrollados tenderán a especializarse en capital humano y en actividades intensivas en capital manufacturado, mientras que en los países en desarrollo esta

tendencia se dará hacia la especialización en bienes intensivos en factores de producción de los que están abundantemente dotados, como la mano de obra barata y los recursos naturales (Stern, 2004). De modo que, gran parte de la disminución de la degradación ambiental en los países desarrollados y el incremento en los países en desarrollo vendría derivada de esta especialización, a través de la cual se transfieren los impactos ambientales de los primeros hacia los segundos (Hettige, Lucas, & Wheeler, 1992; Suri & Chapman, 1998). Esto ha llevado a que algunos autores (Arrow, et al., 1995; Stern, Common, & Barbier, 1996) concluyan que la existencia de una CAK puede estar fuertemente mediada por el efecto del comercio sobre la distribución de las industrias contaminantes.

A estas cuestiones se agrega la planteada por Andreoni y Levinson (2001), que se fundamentan en un modelo de economías de escala para demostrar que la reducción de la degradación ambiental se debe, fundamentalmente, a los rendimientos crecientes a escala. Esto quiere decir que el factor que se encuentra tras la disminución de los impactos ambientales en las economías desarrolladas no es la simple relación que estos mantienen con el crecimiento económico, sino la medida en que un mayor nivel de ingresos permite que se desplieguen inversiones en tecnologías limpias, políticas de mitigación y procesos productivos más eficientes, resultando en una disminución de la contaminación por unidad de producción económica y conduciendo, eventualmente, a una reducción general de la contaminación a pesar del crecimiento económico continuo. La sofisticación alcanzada por las economías de altos ingresos les permite adoptar procesos políticos (regulaciones gubernamentales, impuestos sobre la contaminación, incentivos para tecnologías limpias, etc.) con los cuales internalizar adecuadamente las externalidades ambientales (Jones & Manuelli, 1995), asumiendo los costos fijos y obteniendo rendimientos de escala crecientes. Esta senda no puede ser adoptada por las economías menos desarrolladas, que se ven forzadas a utilizar tecnologías y procesos productivos menos eficientes y más contaminantes y no tienen la capacidad de desarrollar un marco regulatorio eficaz (Stokey, 1998).

Por tanto, mientras que la hipótesis CAK plantea que el desacoplamiento ocurre tras un alcanzar un estado óptimo de desarrollo económico, la paradoja de Jevons postula que el desacoplamiento no ocurre, dado que las mejoras de eficiencia incentivan que se incremente la producción y el consumo. Este, como decíamos, es un debate abierto, en el cual algunos estudios argumentan tanto a favor la paradoja de Jevons como en contra de su aplicación en economías maduras (Cullenward & Koomey, 2016; Saunders, 2013; Saunders, 2017; Sorrell, Dimitropoulos, & Sommerville, 2009), así como algunos refutan la existencia de la CAK (Allard, Takman, Uddin, & Ahmed, 2018; Gyamfi, Adedoyin,

Bein, & Bekun, 2021; Frodyma, Papież, & Smiech, 2020; Stern, 2004; Wagner, 2008) mientras que otros reportan evidencias de su presencia en algunos países (Al-mulali, Tang, & Ozturk, 2015; Apergis, 2016; Apergis & Ozturk, 2015; Balaguer & Cantavella, 2016; Javid & Sharif, 2016; Mohammed, et al., 2024; Nassani, Aldakhil, Qazi Abro, & Zaman, 2017; Wang, et al., 2017).

Con todo lo mencionado, podemos plantear que en un contexto en el que las estructuras económica y tecnológica se mantuviesen constantes, es decir, sin cambios, el crecimiento puro en la escala de la economía implicaría un incremento de los impactos ambientales (John & Pecchenino, 1994; Stern, 2004). Sin embargo, los defensores de la CAK oponen a esto que, alcanzados los niveles más altos de desarrollo, las transformaciones estructurales hacia industrias y servicios intensivos en información y tecnologías eficientes, junto con regulaciones ambientales más estrictas y mayores inversiones en energías renovables y otras tecnologías y medidas de mitigación, se traducen en una estabilización y progresiva reducción de la degradación ambiental (John & Pecchenino, 1994; Panayotou, 1993; Stern, 2004). Mientras que para los defensores de la CAK esto se traduce en un desacoplamiento absoluto, para los autores próximos a la paradoja de Jevons la disociación entre el crecimiento y la degradación ambiental es débil y, generalmente, limitada a casos específicos y por periodos cortos de tiempo.

3. Metodología.

3.1. Datos

En este trabajo utilizamos datos de series de tiempo que abarcan de 1970 a 2021. La selección de este periodo se basa, principalmente, en la disponibilidad de datos para el mayor número posible de países de ingreso alto¹ y para la totalidad de las variables incluidas.

Como se puede comprobar en la Tabla 1, los datos para el PIB se han obtenido de las series proporcionadas por el Banco Mundial; los relativos a las emisiones de CO₂, el consumo de energía renovable y el consumo de energía procedente de combustibles fósiles se han obtenido de las series proporcionadas por Our World in Data; y los referidos al consumo doméstico de materiales y la huella material se han obtenido de la base de

¹ La selección de los países de ingreso alto se ha realizado tomando como referencia la clasificación realizada por el Banco Mundial ([World Bank Income Classifications FY24](#)). Los países excluidos de este estudio no disponían de datos suficientes en alguno o varios de los indicadores utilizados. Los países estudiados en base a los criterios mencionados son: Alemania, Australia, Austria, Bélgica, Canadá, Chile, Corea del Sur, Dinamarca, Estados Unidos, España, Finlandia, Francia, Grecia, Irlanda, Italia, Japón, Luxemburgo, Noruega, Países Bajos, Portugal, Reino Unido, Suecia.

datos sobre flujos globales de materiales del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 2022).

Tabla 1. Variables empleadas.

Variable	Magnitud	Fuente
Producto Interior Bruto (PIB)	Dólares per cápita a precios constantes de 2010	World Bank
Emisiones de CO ₂ territoriales (CO ₂ t)	Toneladas per cápita	Our World in Data
Emisiones de CO ₂ basadas en el consumo (CO ₂ c)	Toneladas per cápita	Our World in Data
Consumo Material Doméstico (CMD)	Toneladas per cápita	Material Flows Database
Huella Material (HM)	Toneladas per cápita	Material Flows Database
Consumo de Energía Renovable (CERV)	Kilovatios-hora per cápita	Our World in Data
Consumo de Energía procedente de Combustibles Fósiles (CECF)	Kilovatios-hora per cápita	Our World in Data

Fuente: elaboración propia.

3.2. Índice de desacoplamiento

Desde la década de 1990 se ha intensificado notablemente el estudio del desacoplamiento entre la degradación ambiental y el crecimiento económico. Sin embargo, no es hasta principios del siglo XXI cuando la OCDE desarrolla un primer indicador de desacoplamiento (OECD, 2002). Poco después, Tapio (2005) creó un indicador y un método que se ha transformado en el enfoque más utilizado para la evaluación del desacoplamiento. A partir de ese momento, se han llevado a cabo investigaciones sobre el desacoplamiento entre el crecimiento y diversas variables, tales como la degradación ambiental o el uso de energía (Bithas & Kalimeris, 2018; Chen, Wang, Cui, Shuo, & Song, 2018; Cohen, Jalles, Loungani, & Marto, 2018; Dong, Li, Zhang, & Zhu, 2021; Foster, Uju Dim, Vollmer, & Zhang, 2023; Frodyma, Papież, & Smiech, 2020; Kan, Chen, & Chen, 2019; Song, Sun, Zhang, & Su, 2020; Wang, Jiang, & Zhan, 2019).

Dentro de la multiplicidad de estudios del campo del desacoplamiento, además de la utilización de diferentes indicadores según el objeto de estudio, se pueden encontrar dos tipos de enfoques metodológicos para la obtención de los datos: el territorial, donde los datos se enfocan en la producción dentro de las fronteras de un país, y el de consumo, donde se trata de capturar el efecto del comercio internacional (Piñero, Bruckner, Wieland, Pongrácz, & Giljum, 2019). La progresiva descentralización de las cadenas de suministro global ha provocado que este enfoque haya ido tomando cada vez más relevancia dentro de la literatura académica (Kan, Chen, & Chen, 2019), ya que desde el enfoque territorial se subestima la participación de los países desarrollados en los procesos de degradación ambiental.

El índice de desacoplamiento de Tapio se obtiene al calcular el cociente de la variación del factor A y la variación del factor B, expresando, así, la elasticidad del factor A respecto al factor B (Tapio, 2005). En el caso de este trabajo, la relación entre la degradación ambiental, expresada en términos tanto de consumo de materiales como de emisiones de CO₂, y el PIB se formula del siguiente modo:

$$IDT = \frac{\% \Delta CM}{\% \Delta PIB} \quad (1)$$

$$IDT = \frac{\% \Delta CO_2}{\% \Delta PIB} \quad (2)$$

Esto es, de manera más desarrollada:

$$IDT = \frac{(CM_t - CM_{t_0})}{CM_{t_0}} / \frac{(PIB_t - PIB_{t_0})}{PIB_{t_0}} \quad (3)$$

$$IDT = \frac{(CO_2_t - CO_2_{t_0})}{CO_2_{t_0}} / \frac{(PIB_t - PIB_{t_0})}{PIB_{t_0}} \quad (4)$$

Por tanto, en lo que se refiere a esta investigación, el IDT representa la relación existente entre la variación en las emisiones de CO₂ o en el consumo de materiales respecto a la variación del PIB.

Como se puede observar en la Tabla 2, el desacoplamiento se subdivide en tres subcategorías: 1) Desacoplamiento Fuerte, en la que en la cual el PIB crece a la vez que disminuye el indicador de la degradación ambiental, resultado en un cociente menor o igual a 0; 2) Desacoplamiento Débil, donde tanto el PIB como el indicador de degradación ambiental crecen, pero la degradación ambiental lo hace a un ritmo inferior al PIB, obteniendo un cociente mayor que 0 y menor o igual a 0.8; y 3) Desacoplamiento Recesivo, en el que tanto el PIB como el indicador de degradación ambiental disminuyen, aunque este segundo a mayor velocidad, dando un cociente superior a 1.2.

El desacoplamiento negativo se subdivide a su vez, también, en otras tres categorías: 1) Desacoplamiento Negativo Expansivo, que se produce cuando la degradación ambiental crece a un ritmo superior al aumento del PIB, dando como resultado un cociente superior a 1.2; 2) Desacoplamiento Negativo Fuerte, en el cual el PIB decrece a la vez que se incrementa el indicador de degradación ambiental, obteniéndose un cociente igual o menor que 0; y 3) Desacoplamiento Negativo Débil, en el que el PIB disminuye a un ritmo superior al decrecimiento del indicador de degradación ambiental, obteniéndose un cociente mayor que 0 e igual o menor a 0.8.

Por último, el acoplamiento se subdivide en dos categorías: 1) Acoplamiento Recesivo, cuando el PIB y el indicador de degradación ambiental decrecen y se obtiene un cociente mayor que 0 y menor o igual a 1.2; y 2) Acoplamiento Expansivo, que se produce cuando aumentan tanto el PIB como el indicador de degradación ambiental y se obtiene un cociente superior a 0.8 y menor o igual a 1.2.

Tabla 2. Categorías de desacoplamiento.

Categoría	Subcategoría	PIB	CM o CO2	IDT
Desacoplamiento	Desacoplamiento fuerte (DF)	>0	<0	≤0
	Desacoplamiento débil (DD)	>0	>0	≥0 y ≤0.8
	Desacoplamiento recesivo (DR)	<0	<0	>1.2
Desacoplamiento negativo	Desacoplamiento negativo expansivo (DNE)	>0	>0	>1.2
	Desacoplamiento negativo fuerte (DNF)	<0	>0	≤0
	Desacoplamiento negativo débil (DND)	<0	<0	≥0 y ≤0.8
Acoplamiento	Acoplamiento recesivo (AR)	<0	<0	>0.8 y ≥1.2
	Acoplamiento expansivo (AE)	>0	>0	>0.8 y ≥1.2

Fuente: adaptado de Tapio (2005).

3.3. STIRPAT: Elasticidad ecológica

En economía el concepto de elasticidad se refiere a la variación porcentual que produce el cambio unitario de una variable independiente sobre una variable dependiente, cuando el resto de los factores se mantienen constantes (Nordhaus & Samuelson, 2004). En el caso que nos ocupa, se trata de la influencia que el ingreso, medido en términos del PIB, ejerce sobre la degradación ambiental, medida en términos de consumo de materiales y de emisiones de CO². Como se puede advertir, conceptualmente este enfoque guarda un alto grado de correspondencia con el índice de desacoplamiento ideado por Tapio (2005), sin embargo, al adicionar un término de error residual a la fórmula de elasticidad, se consigue una ecuación estocástica, sobre la que se pueden aplicar técnicas de estimación estadística como la regresión empleando datos de corte transversal, series temporales o datos de panel (York, Rosa, & Dietz, 2003).

El origen de este modelo se encuentra en el IPAT, que es una fórmula ideada para estudiar el efecto de la actividad humana sobre el medio ambiente (York, Rosa, & Dietz, 2003). Las primeras formulaciones del IPAT surgen a principios de los años 70 a raíz del debate entre Ehrlich-Holdren y Commoner (Commoner, 1972; Ehrlich & Holdren, 1971; Holdren & Ehrlich, 1974) en relación con los principales factores que influyen en los impactos ambientales causados por la actividad humana. La formulación original del modelo IPAT se basaba en dos factores: la población y el impacto ambiental per cápita, expresados en función de la población (Ehrlich & Holdren, 1971). Posteriormente, el modelo fue reformulado como el producto de tres factores: la población (P), el ingreso per cápita (A) y la tecnología (T), resultando en la expresión I=PAT (York, Rosa, & Dietz, 2003). De este modo, cada uno de los factores especificados en este modelo, al multiplicarse entre sí, se interrelaciona con los demás, por lo que, si uno de ellos es modificado, el impacto ambiental cambiará como consecuencia de esta interacción (York, Rosa, & Dietz, 2003). Este hecho es especialmente relevante, ya que la posibilidad de observar en qué dirección se han desplazado las variables nos permite valorar la influencia de los procesos históricos o de las intervenciones políticas sobre el impacto ambiental (York, Rosa, & Dietz, 2003).

El modelo IPAT es especialmente útil por su simpleza y la facilidad de generalización, lo que lo hace una herramienta valiosa para desarrollar teorías sobre el impacto ambiental (Dietz & Rosa, 1994; Fischer-Kowalski & Amann, 2001; York, Rosa, & Dietz, 2003). Sin embargo, no es adecuada para la verificación de hipótesis, dado que presupone una relación proporcional entre unos factores conocidos que determinan los desconocidos (Fischer-Kowalski & Amann, 2001; York, Rosa, & Dietz, 2003). Para superar esta limitación, se transformó el modelo IPAT en un modelo estocástico conocido como

STIRPAT (Dietz & Rosa, 1994; York, Rosa, & Dietz, 2003). En su expresión logarítmica, el modelo se expresa del siguiente modo:

$$\log I = a + b(\log P) + c(\log A) + d(\log T) + e \quad (5)$$

Siendo a la ordenada en el origen, b , c y d representan los coeficientes a estimar para conocer el efecto de la población (P), el ingreso (A) y la tecnología (T) sobre el impacto (I), y e es el término de error (Dietz & Rosa, 1994; York, Rosa, & Dietz, 2003). Generalmente, el factor T es omitido del modelo e incluido en el término de error a causa de la dificultad de acotar apropiadamente que debe incluirse en él. Además, dado que lo que pretendemos estimar en este trabajo es la elasticidad ecológica del flujo de entrada, es decir, el efecto que cada unidad de ingreso adicional tiene sobre el impacto ecológico medido, es suficiente con tomar los datos en términos per cápita y desplazar T al término de error. De este modo, la ecuación resultante es la que sigue:

$$\log I = a + c(\log A) + e \quad (6)$$

Por tanto, el coeficiente obtenido representa la intensidad de la relación entre los ingresos y el impacto ambiental, permitiéndonos evaluar el grado de acoplamiento o desacoplamiento entre ambos (Steinberger, Krausmann, Getzner, & West, 2013; York, Rosa, & Dietz, 2003). La interpretación que toma este coeficiente se recoge en la Tabla 3. Así, de modo similar a lo expuesto en el índice de desacoplamiento de Tapio, si el coeficiente es mayor que 0 y menor que 1, siendo la variación del ingreso superior a la variación del impacto, siempre que el resultado de la variación del impacto mayor que 0, se trata de una situación de desacoplamiento relativo; en el caso de un coeficiente menor o igual a 0, donde la variación del ingreso es superior a la variación del impacto, siendo la variación de este último menor que 0, hablamos de desacoplamiento absoluto; y cuando el coeficiente toma un valor igual o mayor que 1, con una variación del impacto superior a la variación del ingreso, siendo la variación del ingreso superior a 0, nos encontramos con una situación de acoplamiento.

Tabla 3. Categorías de Elasticidad Ecológica.

Categoría	Elasticidad Ecológica	Interpretación
Desacoplamiento Relativo	> 0 y < 1	$\Delta A > \Delta I > 0$
Desacoplamiento absoluto	≤ 0	$\Delta A > \Delta I$ ($\Delta I < 0$)
Acoplamiento	≥ 1	$\Delta I > \Delta A$ ($\Delta A > 0$)

Fuente: adaptado de Song et al. (2020).

3.4. Curva Ambiental de Kuznets

El modelo STIRPAT especificado anteriormente presupone una relación lineal entre las variables implicadas, sin embargo, pueden darse relaciones no monótonas que no respondan a este patrón de linealidad. El estudio de esta relación no lineal entre el ingreso y la degradación ambiental fue iniciado por Grossman y Krueger (1991) y, posteriormente, ampliado por Panayotou (1993), que planteó que la degradación ambiental y el ingreso económico se relacionan en forma de U invertida. Este hecho llevó a calificar esta relación como Curva Ambiental de Kuznets (CAK), ya que esta se basa en la relación descrita por Kuznets (2019 [1984]) entre el desarrollo económico y la reducción de la desigualdad.

La dinámica de esta relación se divide en dos fases. Inicialmente, el desarrollo de la estructura económica eleva las condiciones materiales de la población, pero este proceso implica, también, un considerable incremento del uso de recursos, lo que da lugar a un aumento de la degradación ambiental. Posteriormente, la adopción de innovaciones técnicas, que dan lugar a prácticas más eficientes, permite que el desarrollo económico se desvincule del uso intensivo de recursos, lo que, junto con el desarrollo de valores posmateriales que demandan políticas y hábitos sostenibles (Inglehart, 1977), deriva en una progresiva reducción de la degradación ambiental.

En estudios posteriores (Allard, Takman, Uddin, & Ahmed, 2018; Awam & Azam, 2022; Fakher, Ahmed, Acheampong, & Nathaniel, 2023; Grossman & Krueger, 1995; Gyamfi, Adedoyin, Bein, & Bekun, 2021; Moomaw & Unruh, 2001; Numan, Ma, Meo, & Bedru, 2022; Shezad, Zeraibi, & Zaman, 2022; Shouwu, Xu, Shezad, Zaman, & Wuyue, 2024) se ha explorado la posibilidad de que la CAK tome una forma de N o N invertida, es decir, que responda a una función cúbica. De este modo, la forma de N expresa una relación en la que, alcanzado un cierto punto de saturación en el progreso técnico, las mejoras de eficiencia se estancan y son insuficientes para garantizar que el crecimiento económico permanezca desacoplado de los impactos ambientales (Allard, Takman, Uddin, & Ahmed, 2018; Torras & Boyce, 1998). Por su parte, la N invertida responde a una situación en la que, tras una disminución significativa de la degradación ambiental como consecuencia de los avances técnicos, la generalización de estas mejoras de eficiencia conduce a un efecto rebote por el incremento en la escala de producción; disminuyendo de nuevo en el mediano y largo plazo una vez que nuevos avances técnicos posibiliten mayores mejoras de eficiencia que vuelvan a permitir que el crecimiento económico se desacople completamente de la degradación ambiental (Allard, Takman, Uddin, & Ahmed, 2018; Torras & Boyce, 1998).

La flexibilidad del modelo STIRPAT permite que se puedan introducir nuevas variables y términos exponenciales para evaluar la existencia de una relación no lineal entre el PIB y la degradación ambiental (York, Rosa, & Dietz, 2003). Para verificar la no monotonidad de la relación de las dos variables estudiadas, se introducen en el modelo los términos cuadrático y cúbico del PIB:

$$\log I = \alpha_0 + \beta_1 + \beta_2(\log PIB)^2 + \beta_3(\log PIB)^3 + \varepsilon \quad (7)$$

Además, se agrega el consumo de energía procedente de combustibles fósiles (CECF) y el consumo de energía renovable (CERV), como términos que estudian la relación entre la degradación ambiental y la tecnología, quedando el modelo del siguiente modo:

$$\log I = \alpha_0 + \beta_1(\log PIB) + \beta_2(\log PIB)^2 + \beta_3(\log PIB)^3 + \beta_4(\log CECF) + \beta_5(\log CERV) + \varepsilon \quad (8)$$

Es importante reseñar que la introducción de términos exponenciales, así como de nuevas variables en el modelo STIRPAT, puede dar lugar a problemas de multicolinealidad, lo cual provoca una alta inestabilidad en los resultados obtenidos (García García, García García, Salmerón Gómez, & García Pérez, 2017). De este modo, con pequeñas variaciones en las variables explicativas obtendremos estimaciones muy diferentes, tomando los regresores estimados una varianza muestral elevada (García García, García García, Salmerón Gómez, & García Pérez, 2017). Para evitar este problema, en los casos en los que el Factor de Inflación de Varianza (FIV)² tenga un valor superior a 10, se determina que existe un problema importante de multicolinealidad y se procede a ortogonalizar las variables implicadas. El objetivo de esta operación es aislar el efecto de una de las variables respecto del resto de variables independientes del modelo a través de una regresión auxiliar:

$$x_1 = \alpha_0 + \alpha_1 x_2 + v \quad (9)$$

Al estimar esta regresión por mínimos cuadrados ordinarios (MCO) se obtiene los residuos del modelo (e_1), que representan la parte de la variable x_1 que no está relacionada con la variable x_2 (García García, García García, Salmerón Gómez, & García Pérez, 2017). Los residuos estimados, e_1 , se introducen en el modelo inicial sustituyendo la variable x_1 :

$$y = \beta_0 + \beta_1 e_1 + \beta_2 x_2 + u \quad (10)$$

² El factor de Inflación de varianza se calcula del siguiente modo: $FIV_k = \frac{1}{1-R_k^2}$, siendo R_k^2 el coeficiente de determinación de la regresión de la variable k en función del resto de variables explicativas del modelo (García García, García García, Salmerón Gómez, & García Pérez, 2017).

Así, se incluye la parte de la variable x_1 que no comparte información con x_2 , mitigando la presencia de multicolinealidad del modelo, lo cual nos permite operar con unos resultados confiables.

El objetivo de estimar el modelo expresado en la ecuación 8 es obtener el signo de los coeficientes para observar la dirección que toma la curva e interpretar, así, el sentido del efecto que tienen las variables implicadas sobre la degradación ambiental. Como se aprecia en la Tabla 4, en función del signo de cada uno de los coeficientes, la CAK toma distintas interpretaciones. Cuando todos los coeficientes son cero, se interpreta que no hay relación entre las variables. Si tenemos un coeficiente β negativo y los otros coeficientes en cero se interpreta como una relación lineal, mientras que un β positivo con los otros coeficientes en cero señala una relación lineal positiva. Si β es negativo y β^2 positivo con β^3 en cero, la curva toma la forma de una U; si β es positivo, β^2 negativo y β^3 en cero, la curva es una U invertida. Por su parte, una curva en forma de N se da cuando β y β^3 son positivos y β^2 es negativo, y una N invertida cuando β y β^3 son negativos y β^2 positivo. Finalmente, un polinomio cúbico puede tener la forma de una U invertida si β y β^2 son positivos y β^3 es negativo, o la forma de una U si β y β^2 son negativos y β^3 es positivo.

Tabla 4. Interpretaciones de la curva CAK.

Signo del coeficiente	Interpretación
$\beta = \beta^2 = \beta^3 = 0$	Sin relación
$\beta < 0, \beta^2 = \beta^3 = 0$	Relación lineal negativa
$\beta > 0, \beta^2 = \beta^3 = 0$	Relación lineal positiva
$\beta < 0, \beta^2 > 0, \beta^3 = 0$	Forma de U
$\beta > 0, \beta^2 < 0, \beta^3 = 0$	Forma de U invertida
$\beta > 0, \beta^2 < 0, \beta^3 > 0$	Forma de N
$\beta < 0, \beta^2 > 0, \beta^3 < 0$	Forma de N invertida
$\beta > 0, \beta^2 > 0, \beta^3 < 0$	Polinomio cúbico en forma de U invertida
$\beta < 0, \beta^2 < 0, \beta^3 > 0$	Polinomio cúbico en forma de U

Fuente: adaptado de Fakher et al. (2023).

4. Resultados y discusión

Una primera aproximación descriptiva a los datos nos permite identificar algunas cuestiones relevantes para nuestro análisis. Como se puede apreciar en la Figura 5, desde 1970 el PIB ha crecido a un ritmo superior al de los indicadores de impacto ambiental, dando lugar a una situación de desacoplamiento. La evolución de los indicadores de impacto ambiental es similar durante todo el periodo de estudio, pero el consumo doméstico de materiales y la huella material son superiores a las emisiones de CO₂. Además, en el caso de las emisiones, especialmente en el enfoque territorial, se puede apreciar una fase de desacoplamiento absoluto que se inicia tras las Crisis de 2008. Este periodo coincide con una etapa de ralentización económica en la cual el PIB crece a un ritmo notablemente inferior a todo el periodo anterior. Por su parte, si bien tanto el consumo material doméstico y la huella material no llegan a decrecer de manera sostenida, si presentan una tendencia hacia un menor crecimiento.

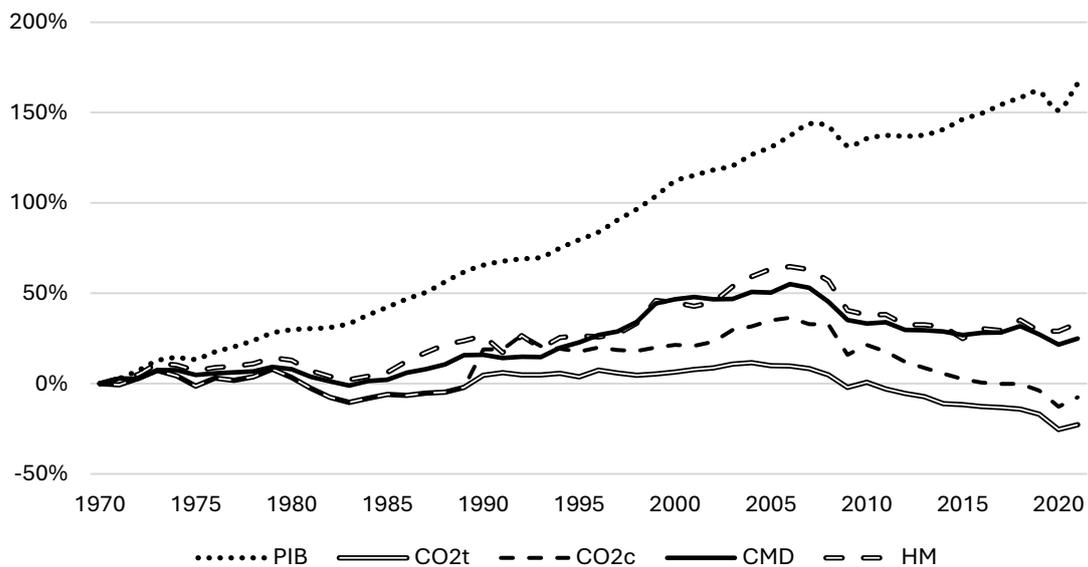


Figura 5. Tasa de variación del PIB, el CO₂ territorial (CO₂t), el CO₂ basado en el consumo (CO₂c), el consumo material doméstico (CMD) y la huella material (HM).

Fuente: elaboración propia a partir de datos del Banco Mundial, Our World in Data y Material Flows Database.

4.1. Índice de desacoplamiento de Tapio

En esta sección se presentan y analizan los resultados del índice de desacoplamiento de Tapio. La Tabla 5 muestra los resultados referentes a las emisiones de CO₂, tanto territorial como basado en el consumo, para el periodo 1970-2021. Como se puede observar, Alemania, Canadá, Dinamarca, Estados Unidos, Francia, Luxemburgo, Países Bajos, Reino Unido y Suecia han experimentado una situación de desacoplamiento fuerte para las emisiones de CO₂ tanto desde la perspectiva territorial como desde la de consumo en

el periodo 1970-2021. Esto implica que, no solo el PIB ha crecido a un mayor ritmo que las emisiones de CO₂, sino que, además, las emisiones han disminuido en dicho lapso temporal. El hecho de que se presente una situación de desacoplamiento fuerte en ambos indicadores nos informa de que la mencionada disminución de la cantidad de emisiones no se ha producido, principalmente, a través del traslado de la carga a terceros países. Es decir, contrariamente a lo que ocurre en otros casos observados en la literatura académica (Arto, Roca, & Serrano, 2012; Dittrich, Bringezu, & Schütz, 2012; Wiedmann, Schandl, Lenzen, & Kanemoto, 2015), el desacoplamiento observado en estos países no parece estar completamente determinado por los procesos de deslocalización productiva que se dan en el contexto de una creciente terciarización de la estructura económica. Sin embargo, en el caso de Bélgica y Finlandia, que muestran un desacoplamiento fuerte en términos de emisiones de CO₂ territorial, pero que al incluir la perspectiva de consumo revelan un desacoplamiento débil, si nos encontramos con una situación en la que la deslocalización de la producción da lugar a una externalización de emisiones que se refleja posteriormente como una reducción de la carga ecológica de dicho país.

Tabla 5. Resultados del índice de desacoplamiento de Tapio para las emisiones de CO₂ territorial (CO₂t) y CO₂ basado en el consumo (CO₂c).

	1970-2021							
	PIB	CO ₂ t	ID		PIB	CO ₂ c	ID	
Alemania	1,397	-0,379	-0,271	DF	1,397	-0,240	-0,172	DF
Australia	1,207	0,270	0,224	DD	1,207	0,112	0,093	DD
Austria	1,485	0,091	0,061	DD	1,485	0,457	0,308	DD
Bélgica	1,424	-0,368	-0,258	DF	1,424	0,319	0,224	DD
Canadá	1,071	-0,115	-0,108	DF	1,071	-0,173	-0,162	DF
Chile	2,409	0,821	0,341	DD	2,409	0,935	0,388	DD
Corea del Sur	15,580	6,214	0,399	DD	15,580	7,070	0,454	DD
Dinamarca	1,199	-0,599	-0,499	DF	1,199	-0,367	-0,306	DF
Estados Unidos	1,444	-0,311	-0,215	DF	1,444	-0,237	-0,164	DF
España	1,308	0,403	0,308	DD	1,308	0,659	0,504	DD
Finlandia	1,695	-0,218	-0,128	DF	1,695	0,066	0,039	DD
Francia	1,159	-0,478	-0,413	DF	1,159	-0,293	-0,253	DF
Grecia	0,768	0,952	1,240	DNE	0,768	0,726	0,946	AE
Irlanda	6,486	0,141	0,022	DD	6,486	0,413	0,064	DD
Italia	1,032	0,024	0,023	DD	1,032	0,317	0,307	DD
Japón	1,529	0,170	0,111	DD	1,529	0,349	0,228	DD
Luxemburgo	2,109	-0,674	-0,320	DF	2,109	-0,661	-0,313	DF
Noruega	1,910	0,052	0,027	DD	1,910	0,144	0,076	DD
Países Bajos	1,290	-0,265	-0,205	DF	1,290	-0,137	-0,107	DF
Portugal	1,717	1,212	0,706	DD	1,717	1,718	1,001	AE
Reino Unido	1,380	-0,560	-0,406	DF	1,380	-0,349	-0,253	DF

Suecia	1,248	-0,680	-0,545	DF	1,248	-0,434	-0,348	DF
--------	-------	--------	--------	----	-------	--------	--------	----

Fuente: elaboración propia.

En el resto de los países de ingreso alto estudiados, comprobamos que la situación predominante es la del desacoplamiento débil en ambos indicadores. En el caso de Australia podemos observar que la inclusión de la perspectiva de consumo hace que su carga ecológica disminuya hasta aproximarse al desacoplamiento fuerte, lo cual nos indica que es un país que importa emisiones. Esto puede estar asociado a que en el país oceánico exporta una gran cantidad de productos minerales³, asociados a actividades extractivas que producen una importante carga en términos de emisiones de CO₂. En el caso del resto de países se evidencia que su impacto ambiental se incrementa al tomar en cuenta la perspectiva de consumo, lo cual los convierte en exportadores de emisiones. Con la excepción de Grecia, que presenta una situación de desacoplamiento negativo expansivo en términos de emisiones de CO₂ territorial, es decir, que sus emisiones crecen a un ritmo superior al incremento de su PIB, pero que torna en acoplamiento expansivo al incluir el consumo en la ecuación.

Por otra parte, la Tabla 6 muestra los resultados para el Consumo Material Doméstico y la Huella Material. Aquí la situación es notablemente diferente a la que acabamos de apreciar en el caso de las emisiones de CO₂. En el caso del Consumo Material Doméstico, que corresponde a la perspectiva territorial, nos encontramos a Alemania, Austria, Bélgica, Estados Unidos, Francia, Grecia, Italia, Países Bajos y Reino Unido en una situación de desacoplamiento fuerte. Esto implica que, de los 22 países estudiados, tan sólo 7 (Alemania, Bélgica, Dinamarca, Estados Unidos, Francia, Países Bajos y Reino Unido) presentan un desacoplamiento absoluto para los dos indicadores de impacto ambiental (emisiones de CO₂ y consumo de materiales) en términos territoriales. Además, sólo dos países, Alemania y Estados Unidos, mantienen un nivel de desacoplamiento fuerte una vez se incluye la perspectiva de consumo, lo cual nos indica que en términos materiales el desacoplamiento observado si parece estar determinado por los procesos de deslocalización productiva y de tercerización de la estructura económica, a través de los que los países de ingreso alto trasladan buena parte de su carga ecológica a terceros países (Arto, Roca, & Serrano, 2012; Dittrich, Bringezu, & Schütz, 2012; Wiedmann, Schandl, Lenzen, & Kanemoto, 2015). A estos dos países se agrega Australia, que en la línea de lo que hemos comentado anteriormente sobre su estructura productiva, al tomar en cuenta

³ En 2022 más del 75% de las exportaciones de Australia tuvieron relación con productos minerales según los datos del Observatory of Economic Complexity. (<https://oec.world/en/profile/country/aus?flowSelector1=flow0&yearlyTradeFlowSelector=flow0&depthSelector1=HS2Depth>)

el consumo reduce su impacto ambiental, dado que exporta una gran cantidad de productos minerales.

Tabla 6. Resultados del índice de desacoplamiento de Tapio para el Consumo Material Doméstico (CMD) y la Huella Material (HM).

	1970-2021							
	PIB	CMD	ID		PIB	HM	ID	
Alemania	1,397	-0,246	-0,176	DF	1,397	-0,112	-0,080	DF
Australia	1,207	0,039	0,032	DD	1,207	-0,139	-0,116	DF
Austria	1,485	-0,081	-0,054	DF	1,485	0,444	0,299	DD
Bélgica	1,424	-0,361	-0,253	DF	1,424	0,124	0,087	DD
Canadá	1,071	0,330	0,308	DD	1,071	0,257	0,240	DD
Chile	2,409	4,106	1,704	DNE	2,409	0,743	0,308	DD
Corea del Sur	15,580	3,880	0,249	DD	15,580	3,681	0,236	DD
Dinamarca	1,199	-0,002	-0,002	DF	1,199	0,479	0,399	DD
Estados Unidos	1,444	-0,244	-0,169	DF	1,444	-0,062	-0,043	DF
España	1,308	-0,076	-0,058	DF	1,308	0,308	0,235	DD
Finlandia	1,695	0,283	0,167	DD	1,695	0,545	0,321	DD
Francia	1,159	-0,190	-0,164	DF	1,159	0,065	0,056	DD
Grecia	0,768	-0,261	-0,340	DF	0,768	0,185	0,241	DD
Irlanda	6,486	-0,063	-0,010	DF	6,486	0,756	0,117	DD
Italia	1,032	-0,317	-0,307	DF	1,032	0,078	0,076	DD
Japón	1,529	0,145	0,095	DD	1,529	0,346	0,226	DD
Luxemburgo	2,109	0,367	0,174	DD	2,109	0,667	0,316	DD
Noruega	1,910	3,148	1,648	DNE	1,910	0,931	0,487	DD
Países Bajos	1,290	-0,282	-0,219	DF	1,290	0,463	0,359	DD
Portugal	1,717	0,897	0,523	DD	1,717	0,542	0,316	DD
Reino Unido	1,380	-0,127	-0,092	DF	1,380	0,145	0,105	DD
Suecia	1,248	0,201	0,161	DD	1,248	0,196	0,157	DD

Fuente: elaboración propia.

En una situación similar a la de Australia se encuentran Chile y Noruega, que, siendo grandes exportadores de minerales y combustibles fósiles, al tomar en cuenta la perspectiva de consumo reducen notablemente su impacto ambiental, pero sin llegar a alcanzar una situación de desacoplamiento fuerte. En el caso del resto de países analizados advertimos que o bien se mantienen en una situación de desacoplamiento débil en ambos indicadores, no variando en exceso su situación, o bien pasa de tener una situación de desacoplamiento fuerte a una de desacoplamiento débil, lo cual nos indica que son importadores netos.

A estas cuestiones podemos agregar lo observado en las tablas 15, 16, 17 y 18, recogidas en el Anexo y referidas también al índice de desacoplamiento de Tapio, pero con una división en tres subperiodos (1970-1987, 1988-2005 y 2006-2021) que nos permite

analizar si existen diferentes dinámicas a lo largo del período de estudio. A su vez, al mantener espacios de tiempo lo suficientemente amplios nos aseguramos de que las posibles tendencias de desacoplamiento no son fenómenos circunstanciales, sino dinámicas consolidadas en cada etapa concreta.

La conclusión más evidente que nos permiten extraer estos resultados es que la dinámica de desacoplamiento fuerte está muy vinculada al ritmo de crecimiento del PIB. Así, mientras que, en los dos primeros períodos, donde el crecimiento económico es mayor, el desacoplamiento fuerte no es una tendencia generalizada entre los países estudiados, en el periodo 2006-2021, en el cual se da una evidente ralentización del crecimiento económico a raíz de la Crisis de 2008, el desacoplamiento fuerte si se extiende a la mayoría de los países analizados. Esto es muy relevante, ya que nos señala claramente la importancia del contexto económico a la hora abordar la mitigación de los impactos ambientales.

De hecho, si profundizamos un poco más en nuestro análisis, podemos comprobar que dentro de la perspectiva territorial tenemos sólo cinco países (Dinamarca, Estados Unidos, Francia, Reino Unido y Suecia) que mantienen un desacoplamiento fuerte en términos de emisiones de CO₂ y tres (Alemania, Bélgica y Países Bajos) en términos de consumo de materiales. Situación que se agrava en el caso de la perspectiva de consumo, en la cual ningún país alcanza una situación de desacoplamiento en los tres periodos, ni en términos de emisiones de CO₂ ni de huella material. Por tanto, si eliminamos la posibilidad de que un país externalice una parte de sus impactos medioambientales, comprobamos que ninguno de los países de ingreso alto incluidos en este estudio ha alcanzado una situación sostenida en el tiempo de desacoplamiento absoluto en un contexto de aceleración económica constante.

Además, los resultados también nos permiten advertir una cierta fractura norte-sur, ya que los países que han presentado mayores problemas a la hora de mitigar sus impactos ambientales se corresponden, principalmente, con países del sur de Europa (España, Grecia, Italia y Portugal).

4.2. STIRPAT: Elasticidad ecológica.

Tras realizar una primera aproximación a través del análisis de los resultados del índice de desacoplamiento de Tapio, a continuación, se presentan y analizan los resultados relativos a la Elasticidad Ecológica.

En la Tabla 7, que recoge los resultados referidos a las emisiones de CO₂ territorial, podemos observar que 11 (Alemania, Bélgica, Canadá, Dinamarca, Estados Unidos, Finlandia, Francia, Luxemburgo, Países Bajos, Reino Unido y Suecia) de los 22 países se

encuentran en valores de desacoplamiento absoluto, mientras que Grecia y Portugal revelan una situación de acoplamiento. Por su parte, el resto de los países analizados presentan un desacoplamiento relativo, con situaciones de mayor grado de desacoplamiento, como en el caso de Austria o Irlanda, y otras en menor grado, como el caso de Chile o Corea del Sur. Así, estos resultados nos revelan, en línea con lo observado anteriormente, que en términos territoriales la mayoría de los países estudiados consiguen reducir, de manera absoluta o relativa, el impacto ambiental producido por sus emisiones de CO₂.

Tabla 7. Resultados para la elasticidad ecológica de las emisiones de CO₂ territorial en el período 1970-2021⁴.

	Elasticidad Ecológica	Desv. típica	Estadístico t	Valor p	R ²	IC 95%	
Alemania	-0,523	0,039	-13,52	2,48e-018 ***	0,785	-0,600	-0,445
Australia	0,477	0,046	10,45	3,62e-014 ***	0,686	0,386	0,569
Austria	0,181	0,039	4,683	2,20e-05 ***	0,305	0,103	0,259
Bélgica	-0,403	0,065	-6225	9.77e-08 ***	0,437	-0,533	-0,273
Canadá	-0,051	0,039	-1,331	0,189	0,034	-0,129	0,026
Chile	0,670	0,036	18,37	7,09e-024 ***	0,871	0,597	0,743
Corea del Sur	0,734	0,013	56,41	6,15e-047 ***	0,985	0,707	0,760
Dinamarca	-0,719	0,118	-6,081	1,64e-07 ***	0,425	-0,957	-0,482
EE. UU.	-0,317	0,042	-7,625	6,36e-010 ***	0,538	-0,401	-0,234
España	0,485	0,076	6,369	5,82e-08 ***	0,448	0,332	0,638
Finlandia	-0,029	0,075	-0,385	0,702	0,003	-0,180	0,122
Francia	-0,872	0,062	-14,08	5,02e-019 ***	0,799	-0,996	-0,748
Grecia	1,444	0,126	11,5	1,17e-015 ***	0,726	1,192	1,696
Irlanda	0,135	0,038	3,548	0,0009 ***	0,201	0,059	0,212
Italia	0,290	0,075	3,842	0,0003 ***	0,228	0,138	0,441
Japón	0,311	0,034	9,169	2,74e-012 ***	0,627	0,243	0,379
Luxemburgo	-0,545	0,065	-8,421	3,74e-011 ***	0,586	-0,676	-0,415
Noruega	0,202	0,027	7,424	1,31e-09 ***	0,524	0,147	0,256
Países Bajos	-0,215	0,049	-4,391	5,86e-05 ***	0,278	-0,313	-0,116
Portugal	1,170	0,068	17,12	1,47e-022 ***	0,854	1,033	1,307
Reino Unido	-0,573	0,074	-7,73	4,36e-010 ***	0,544	-0,722	-0,424
Suecia	-1,106	0,057	-19,51	5,00e-025 ***	0,884	-1,220	-0,992

Fuente: elaboración propia.

De nuevo, como ocurría en el caso del índice de desacoplamiento de Tapio, en el caso de las emisiones de CO₂ la inclusión de la perspectiva de consumo no provoca cambios especialmente sustanciales. A excepción de Bélgica y Finlandia, que pasan del

⁴ * Denota coeficientes cuyo valor es diferente de 0 a un nivel de significancia del 5%, ** denota coeficientes cuyo valor es diferente de 0 a un nivel de significancia del 1% y *** denota coeficientes cuyo valor es diferente de 0 en un nivel de significancia superior al 1%.

desacoplamiento absoluto al relativo, el resto de los países se mantienen en las mismas categorías que en la perspectiva territorial. Sin embargo, hay que reseñar que el grado de desacoplamiento se reduce en todos los casos de manera notable, con la excepción, de nuevo, de Australia. Además, si observamos los intervalos de confianza, podemos comprobar que Canadá, Países Bajos y Reino Unido se mueven entre el desacoplamiento absoluto y el relativo. En este sentido, aunque como decíamos anteriormente, a partir de los resultados de índice de desacoplamiento de Tapio, no parece que la reducción de las emisiones de CO₂ en estos países este completamente determinada por los procesos de deslocalización, el hecho de que la inclusión de las emisiones basadas en el consumo reduzca sustancialmente su grado de desacoplamiento, si parece indicar que estas dinámicas de externalización de emisiones pueden estar jugando un papel más o menos relevante.

Tabla 8. Resultados para la elasticidad ecológica de las emisiones de CO₂ basadas en el consumo⁵.

	Elasticidad Ecológica	Desv. típica	Estadístico t	Valor p	R2	IC 95%	
Alemania	-0,251	0,045	-5,632	8,13e-07 ***	0,388	-0,341	-0,162
Australia	0,346	0,040	8,538	2,47e-011 ***	0,593	0,264	0,427
Austria	0,685	0,073	9,413	1,18e-012 ***	0,639	0,539	0,832
Bélgica	0,679	0,079	8,559	2,30e-011 ***	0,594	0,520	0,838
Canadá	-0,087	0,054	-1,608	0,114	0,049	-0,195	0,022
Chile	0,713	0,037	19,43	5,91e-025 ***	0,883	0,640	0,787
Corea del Sur	0,778	0,019	40,94	4,00e-040 ***	0,971	0,740	0,817
Dinamarca	-0,205	0,089	-2,305	0,0253 **	0,096	-0,384	-0,026
EE. UU.	-0,204	0,041	-4,923	9,70e-06 ***	0,326	-0,287	-0,121
España	0,655	0,077	8,476	3,08e-011 ***	0,590	0,500	0,810
Finlandia	0,294	0,098	3,002	0,0042 ***	0,153	0,097	0,490
Francia	-0,343	0,075	-4,55	3,44e-05 ***	0,293	-0,495	-0,192
Grecia	1,133	0,192	5,908	3,04e-07 ***	0,411	0,748	1,518
Irlanda	0,328	0,053	6,179	1,15e-07 ***	0,433	0,221	0,434
Italia	0,731	0,079	9,303	1,73e-012 ***	0,634	0,573	0,888
Japón	0,547	0,053	10,34	5,21e-014 ***	0,681	0,441	0,653
Luxemburgo	-0,472	0,074	-6,364	5,93e-08 ***	0,448	-0,620	-0,323
Noruega	0,318	0,028	11,34	1,96e-015 ***	0,720	0,262	0,374
Países Bajos	-0,094	0,089	-1,052	0,298	0,022	-0,273	0,085
Portugal	1,627	0,128	12,68	3,03e-017 ***	0,763	1,369	1,885
Reino Unido	-0,118	0,069	-1,717	0,0922 *	0,056	-0,255	0,020
Suecia	-0,282	0,087	-3,234	0,0022 ***	0,173	-0,457	-0,107

Fuente: elaboración propia.

⁵ * Denota coeficientes cuyo valor es diferente de 0 a un nivel de significancia del 5%, ** denota coeficientes cuyo valor es diferente de 0 a un nivel de significancia del 1% y *** denota coeficientes cuyo valor es diferente de 0 en un nivel de significancia superior al 1%.

Por otra parte, la Tabla 9 presenta los resultados de la elasticidad ecológica para el Consumo Material Doméstico. Como se puede advertir, en este caso, los resultados difieren un poco más de los apreciados con el índice de desacoplamiento de Tapio, con tan sólo 6 países que muestran una clara situación de desacoplamiento absoluto. Italia y Japón también se encuentran en valores inferiores a 0, pero sus resultados no son estadísticamente significativos y sus intervalos de confianza nos indican que su situación oscila entre el desacoplamiento absoluto y el relativo. Además, Chile y Noruega se encuentran en un contexto de acoplamiento, mientras que el resto de los países se mantienen en valores de desacoplamiento relativo, aunque en el caso de Grecia y, sobre todo, de Portugal, se aproximan mucho al acoplamiento, alcanzándose esta situación en sus intervalos de confianza.

Tabla 9. Resultados para la elasticidad ecológica del Consumo Material Doméstico⁶.

	Elasticidad Ecológica	Desv. típica	Estadístico t	Valor p	R ²	IC 95%	
Alemania	-0,251	0,035	-7,154	3,45e-09 ***	0,506	-0,322	-0,181
Australia	0,092	0,031	2,946	0,0049 ***	0,148	0,029	0,155
Austria	0,080	0,044	1,818	0,0751 *	0,062	-0,008	0,169
Bélgica	-0,418	0,056	-7,427	1,29e-09 ***	0,525	-0,532	-0,305
Canadá	0,382	0,041	9,424	1,14e-012 ***	0,640	0,300	0,463
Chile	1,362	0,044	30,8	3,54e-034 ***	0,950	1,273	1,451
Corea del Sur	0,601	0,024	25,32	3,57e-030 ***	0,928	0,553	0,649
Dinamarca	0,197	0,069	2,855	0,0062 ***	0,140	0,058	0,336
EE. UU	-0,246	0,050	-4,968	8,30e-06 ***	0,331	-0,346	-0,147
España	0,385	0,124	3,09	0,0033 ***	0,160	0,135	0,634
Finlandia	0,540	0,060	8,976	5,34e-012 ***	0,617	0,419	0,660
Francia	-0,209	0,046	-4,591	3,00e-05 ***	0,297	-0,301	-0,118
Grecia	0,700	0,179	3,916	0,0003 ***	0,235	0,341	1,059
Irlanda	0,206	0,070	2,92	0,0052 ***	0,146	0,064	0,347
Italia	-0,002	0,124	-0,017	0,986	0,00001	-0,251	0,246
Japón	-0,0003	0,053	-0,006	0,995	0,00004	-0,107	0,106
Luxemburgo	0,283	0,095	2,982	0,0044 ***	0,151	0,093	0,474
Noruega	1,556	0,057	27,29	1,07e-031 ***	0,937	1,442	1,671
Países Bajos	-0,425	0,054	-7,908	2,31e-010 ***	0,556	-0,533	-0,317
Portugal	0,913	0,115	7,913	2,27e-010 ***	0,556	0,682	1,145
Reino Unido	-0,298	0,046	-6,472	4,03e-08 ***	0,456	-0,390	-0,205
Suecia	0,359	0,067	5,336	2,30e-06 ***	0,363	0,224	0,493

Fuente: elaboración propia.

⁶ * Denota coeficientes cuyo valor es diferente de 0 a un nivel de significancia del 5%, ** denota coeficientes cuyo valor es diferente de 0 a un nivel de significancia del 1% y *** denota coeficientes cuyo valor es diferente de 0 en un nivel de significancia superior al 1%.

Al incluir el consumo en el cálculo del consumo de materiales, como se aprecia en la Tabla 10, los casos de desacoplamiento absoluto desaparecen casi por completo. Así, esta situación tan sólo persiste en el caso de Alemania, aproximándose a ella tan sólo Bélgica y Estados Unidos, que alcanzan ligeramente el desacoplamiento absoluto en sus intervalos de confianza. En el resto de los casos predomina una clara situación de desacoplamiento relativo, con la excepción de Grecia, que en su intervalo de confianza alcanza el acoplamiento, además de Portugal y Dinamarca, que sin llegar alcanzar el acoplamiento se aproximan a él en sus intervalos de confianza. A su vez, comprobamos que Chile y Noruega, dos países que, como ya hemos resaltado anteriormente, tienen una estructura económica muy dependiente de sus exportaciones de recursos naturales, pasan de una situación de acoplamiento a una de desacoplamiento relativo al considerar el consumo.

Tabla 10. Resultados para la elasticidad ecológica de la Huella Material⁷.

	Elasticidad Ecológica	Desv. típica	Estadístico t	Valor p	R ²	IC 95%	
Alemania	-0,140	0,039	-3,635	0,0007 ***	0,209	-0,218	-0,063
Australia	0,121	0,052	2,332	0,0238 **	0,098	0,017	0,225
Austria	0,279	0,036	7,829	3,06e-010 ***	0,551	0,207	0,350
Bélgica	0,092	0,049	1,863	0,0683 *	0,065	-0,007	0,190
Canadá	0,388	0,062	6,24	9,24e-08 ***	0,438	0,263	0,512
Chile	0,587	0,031	18,74	2,96e-024 ***	0,875	0,524	0,650
Corea del Sur	0,605	0,018	33	1,32e-035 ***	0,956	0,568	0,642
Dinamarca	0,761	0,073	10,44	3,68e-014 ***	0,686	0,615	0,907
EE. UU.	0,026	0,046	0,562	0,577	0,006	-0,066	0,117
España	0,564	0,100	5,636	8,00e-07 ***	0,389	0,363	0,764
Finlandia	0,515	0,038	13,43	03,23e-018 ***	0,783	0,438	0,592
Francia	0,123	0,046	2,666	0,0103 **	0,124	0,030	0,216
Grecia	0,941	0,141	6,651	2,11e-08 ***	0,469	0,657	1,225
Irlanda	0,484	0,061	7,984	1,76e-010 ***	0,560	0,363	0,606
Italia	0,624	0,079	7,904	2,34e-010 ***	0,555	0,465	0,782
Japón	0,297	0,062	4,773	1,62e-05 ***	0,313	0,172	0,422
Luxemburgo	0,400	0,043	9,378	1,33e-012 ***	0,638	0,314	0,485
Noruega	0,711	0,036	19,51	4,94e-025 ***	0,884	0,638	0,784
Países Bajos	0,355	0,039	9,08	3,73e-012 ***	0,622	0,277	0,434
Portugal	0,686	0,111	6,198	1,08e-07 ***	0,434	0,463	0,908
Reino Unido	0,244	0,054	4,525	3,74e-05 ***	0,291	0,135	0,352
Suecia	0,211	0,044	4,84	1,29e-05 ***	0,319	0,124	0,299

Fuente: elaboración propia.

⁷ * Denota coeficientes cuyo valor es diferente de 0 a un nivel de significancia del 5%, ** denota coeficientes cuyo valor es diferente de 0 a un nivel de significancia del 1% y *** denota coeficientes cuyo valor es diferente de 0 en un nivel de significancia superior al 1%.

De este modo, podemos comprobar que en términos de elasticidad ecológica también se aprecian diferencias relevantes entre el método territorial y el basado en el consumo. El hecho de que todos los países que presentan un desacoplamiento absoluto en la perspectiva territorial, con la excepción de Alemania, pasen a un escenario de desacoplamiento relativo al tomar en cuenta el consumo es consistente con la idea de que la evolución de las economías desarrolladas hacia una creciente financiarización y especialización en el sector servicios da lugar a una deslocalización productiva que transfiere actividades intensivas en consumo de materiales a otras partes del mundo (Davis & Kim, 2015; Schwan, 2017).

La excepción alemana responde a varios factores. Por una parte, el mantenimiento de un grado notable de su industria local (De Ville, 2018) le permite alcanzar un buen nivel de eficiencia en el consumo de recursos, de modo que su dependencia de las materias primas extranjeras le penaliza menos (Schüller, Estrada, & Bringezu, 2008). La menor necesidad de transporte y la mayor eficiencia de su producción industrial en comparación con países menos desarrollados son esenciales para que su impacto ambiental pueda decrecer. Además, su sector agrícola también cuenta con altos estándares de eficiencia y el consumo de combustibles fósiles se ha reducido notablemente.

Por último, los resultados de las tablas 19, 20, 21 y 22 del Anexo nos arrojan información interesante. Como comentábamos el caso del índice desacoplamiento de Tapio, dividir el período analizado en tres subperíodos nos permite contextualizar mejor las tendencias de desacoplamiento y entender cuál es su relación con el crecimiento económico. En términos de emisiones de CO₂, como ocurría en el apartado anterior, comprobamos que en el periodo 2006-2021 se da un escenario en el que la mayoría de los países estudiados (16 en el método territorial y 15 en el método basado en el consumo) presentan un desacoplamiento absoluto. Sin embargo, en lo relativo al consumo de materiales la cantidad de países que presentan un desacoplamiento absoluto en este periodo es menor (10 en el método territorial y 11 en el método basado en el consumo).

Además, los resultados refuerzan lo expuesto en el apartado anterior sobre la dificultad de reducir los impactos ambientales en un contexto de aceleración económica constante. En el período 1988-2005, en el cual se da una gran aceleración económica, previa a la Crisis de 2008, las dinámicas de desacoplamiento absoluto son circunstanciales, dándose una mayor proliferación de situaciones de acoplamiento. Por el contrario, como ya hemos mencionado, en el periodo posterior la ralentización de la economía da lugar a que la mayoría de los países observados consigan reducir sus impactos ambientales hasta alcanzar el desacoplamiento absoluto. Análogamente, se puede intuir también la brecha norte-sur que hemos mencionado en el apartado anterior.

4.3. Curva Ambiental de Kuznets.

En este apartado se presentan los resultados de las estimaciones del modelo descrito en la metodología y basado en la ecuación (8). Las variables utilizadas en el modelo son estacionarias en primeras diferencias y sus residuos son estacionarios, lo cual nos permite suponer que están cointegradas y los estimadores son consistentes. La estimación se ha llevado a cabo a con datos de panel y efectos fijos. Además, para evitar los problemas de multicolinealidad a los que están expuestos los modelos basados en la metodología STIRPAT, se ha procedido a ortogonalizar las variables en los casos en los que es necesario, tal y como se expuesto en el apartado de metodología.

En primer lugar, la Tabla 11 muestra los resultados del modelo para las emisiones de CO₂ territorial. En este caso, se puede apreciar que la CAK tiende hacia una forma de U invertida. En un primer momento, el crecimiento económico provoca que las emisiones de CO₂ se incrementen de manera notable hasta alcanzar un punto máximo en el que comienzan a descender a la par que el crecimiento económico continua. Además, observamos que el coeficiente para el consumo de energía procedente de combustibles fósiles (CECF) es positivo, lo cual nos indica que por cada punto porcentual en que se incrementa esta variable las emisiones de CO₂ territorial se incrementan en más de 1 punto. Por su parte, para el consumo de energía renovable (CERV) obtenemos un coeficiente negativo, lo que indica que la utilización de este tipo de energía reduce las emisiones de CO₂, pero siendo la relación mucho más moderada que en el caso de los combustibles fósiles.

Tabla 11. Resultados del modelo (8) para las emisiones de CO₂ territorial⁸.

	Coefficiente	Desv, Típica	Estadístico t	Valor p	IC 95%	R ²
const	-3,363	0,062	-54,66	0,0000 ***	-3,362	-3.483
PIB	0,541	0,006	90,26	0.0000 ***	0,530	0,553
PIB ²	0,747	0,092	8,108	1.,34e-015***	0,566	0,927
PIB ³	-0,001	0,0001	5,725	1,33e-08 ***	0,0007	0,001
CERV	-0,114	0,002	-54,34	0,0000 ***	-0,118	-0,110
CECF	1,011	0,010	100,5	0,0000 ***	0,992	1,031

Fuente: elaboración propia.

En el caso de las emisiones basadas en el consumo (Tabla 12), la relación no esta tan clara. Si bien el coeficiente del PIB y su término cuadrático muestran una relación creciente entre el ingreso y las emisiones, el término cúbico es muy pequeño y no significativo. Si bien podemos intuir que se trata de una relación lineal positiva que

⁸ * Denota coeficientes cuyo valor es diferente de 0 a un nivel de significancia del 5%, ** denota coeficientes cuyo valor es diferente de 0 a un nivel de significancia del 1% y *** denota coeficientes cuyo valor es diferente de 0 en un nivel de significancia superior al 1%.

comienza a vencerse al aproximarse al punto de inflexión para tender hacia una forma de U invertida, la insignificancia del término cúbico no nos permite determinar claramente la forma que toma esta relación. Por su parte, el coeficiente del consumo de energía renovable es negativo, pero más reducido que en el caso anterior, lo cual señala que tiene una incidencia reducida sobre las emisiones. En lo referido al consumo de combustibles fósiles la relación es mucho más similar a lo observado en las emisiones territoriales, con un coeficiente positivo que se aproxima a 1, indicándonos una estrecha relación positiva con el impacto ambiental.

Tabla 12. Resultados del modelo (8) para las emisiones de CO₂ basadas en el consumo⁹.

	Coeficiente	Desv, Típica	Estadístico t	Valor p	IC 95%		R ²
const	-4,870	0,129	-37,75	1,15e-201 ***	-5,123	-4,616	
PIB	0,699	0,013	55,55	0,0000 ***	0,674	0,724	
PIB ²	2,156	0,193	11,16	1,64e-027 ***	1,777	2,535	
PIB ³	0,0004	0,0004	1,112	0,2663	-0,0004	0,001	0,949
CERV	-0,091	0,004	-20,63	2,42e-080 ***	-0,099	-0,082	
CECF	0,865	0,021	41,00	6,22e-225 ***	0,823	0,906	

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, los resultados para el Consumo Material Doméstico (Tabla 13) nos revelan una CAK que tiende hacia una forma de N. Inicialmente, como sugieren los coeficientes del PIB, el crecimiento de la economía supone un incremento del impacto ambiental. Posteriormente, la relación se invierte, de modo que, a pesar de que el ingreso continúa creciendo, el impacto ambiental disminuye. Por último, la degradación ambiental retoma una senda creciente, pero a un ritmo muy reducido que hace que la curva tenga un aspecto bastante aplanado todavía. Además, el coeficiente referido al consumo de energía renovable es negativo, revelando una relación negativa respecto al consumo de materiales, y el coeficiente del consumo de energía procedente de combustibles fósiles es positivo, pero mostrando una relación más moderada que en el caso de las emisiones de CO₂.

Tabla 13. Resultados del modelo (8) para el Consumo Material Doméstico¹⁰.

	Coeficiente	Desv, Típica	Estadístico t	Valor p	IC 95%		R ²
const	-2,879	0,196	-14,67	1,12e-044 ***	-3,264	-2,494	
PIB	0,568	0,019	29,66	4,49e-143 ***	0,530	0,605	0,868
PIB ²	-2,993	0,294	-10,19	2,31e-023 ***	-3,569	-2,416	

⁹ * Denota coeficientes cuyo valor es diferente de 0 a un nivel de significancia del 5%, ** denota coeficientes cuyo valor es diferente de 0 a un nivel de significancia del 1% y *** denota coeficientes cuyo valor es diferente de 0 en un nivel de significancia superior al 1%.

¹⁰ * Denota coeficientes cuyo valor es diferente de 0 a un nivel de significancia del 5%, ** denota coeficientes cuyo valor es diferente de 0 a un nivel de significancia del 1% y *** denota coeficientes cuyo valor es diferente de 0 en un nivel de significancia superior al 1%.

PIB^3	0,001	0,0006	2,446	0,0146 **	0,0003	0,003
CERV	-0,092	0,007	-13,77	5,94e-040 ***	-0,105	-0,079
CECF	0,450	0,032	15,53	2,23e-049 ***	0,435	0,561

Fuente: elaboración propia.

Por último, los resultados referidos a la Huella Material señalan una relación muy similar a lo descrito en el consumo material doméstico. La CAK toma una forma de N, la relación entre el consumo de energía procedente de combustibles fósiles y la huella material es positiva, y la relativa al consumo de energía renovable y la huella material es negativa.

Tabla 14. Resultados del modelo (8) para la Huella Material¹¹.

	Coefficiente	Desv, Típica	Estadístico t	Valor p	IC 95%		R^2
const	-2,950	0,132	-22,38	5,59e-092 ***	-3,209	-2,691	
PIB	0,590	0,013	45,88	3,45e-259 ***	0,590	0,615	
PIB^2	-0,827	0,197	-4,192	2,99e-05 ***	-1.214	-0.440	0,893
PIB^3	0,003	0,0004	7,040	3,35e-012 ***	0,002	0,003	
CERV	-0,041	0,005	-9,125	3,25e-019 ***	-0,050	-0,032	
CECF	0,402	0,022	18,67	6,66e-068 ***	0,360	0,445	

Fuente: elaboración propia.

Los resultados del Consumo Material Doméstico y de la Huella Material se alinean con el argumento de que la CAK en forma de N apunta a la inconsistencia de la hipótesis CAK original en el largo plazo (Allard, Takman, Uddin, & Ahmed, 2018). Así, la forma de N sugiere que, debido al cada vez más reducido margen para optimizar la distribución de las industrias y los rendimientos decrecientes de las innovaciones tecnológicas, el efecto de escala supera a los efectos de composición y técnicos (Álvarez-Herranz & Balsalobre-Lorente, 2015; Álvarez-Herranz & Balsalobre-Lorente, 2016; Torras & Boyce, 1998). Esto implica que, aunque se continúe buscando incrementar la eficiencia a través de la innovación y la reestructuración industrial, eventualmente se llegará a un punto donde el crecimiento adicional será menos significativo y más difícil de lograr.

Por otra parte, mientras que los resultados para las emisiones de CO₂ territorial están en consonancia con la hipótesis CAK original, los referentes a las emisiones de CO₂ basadas en el consumo plantean una relación creciente positiva que todavía no ha alcanzado el punto de inflexión. Esta divergencia es lógica. Para los países desarrollados es relativamente sencillo reducir sus emisiones territoriales a través de, por un lado, la combinación de procesos productivos, modos de transporte y formas organización industrial más eficientes y técnicamente avanzados, y, por otro, mediante la

¹¹ * Denota coeficientes cuyo valor es diferente de 0 a un nivel de significancia del 5%, ** denota coeficientes cuyo valor es diferente de 0 a un nivel de significancia del 1% y *** denota coeficientes cuyo valor es diferente de 0 en un nivel de significancia superior al 1%.

deslocalización las partes más contaminantes de su cadena de suministro a terceros países con reglamentaciones ambientales menos estrictas, o inexistentes, y mano de obra barata. Sin embargo, cuando se incluyen las emisiones referidas al consumo final y no simplemente las territoriales, estas ventajas se diluyen, ya que gran parte de los productos importados provienen de países menos desarrollados, cuya industria está menos avanzada tecnológicamente, y recorren grandes distancias hasta llegar al destino final, generando su transporte grandes costes ambientales. En este sentido, la progresiva tercerización de las economías de las economías desarrolladas contribuye a aumentar esta brecha, dado que una buena parte de los bienes consumidos cotidianamente requieren de una producción industrial que cada vez está más fragmentada y se realiza a miles de kilómetros del destino final.

5. Conclusiones

El presente trabajo ha explorado la interacción entre el crecimiento económico y la degradación ambiental, utilizando herramientas analíticas como el índice de desacoplamiento de Tapio, la elasticidad ecológica y la Curva Ambiental de Kuznets (CAK). La combinación de estos tres métodos ha demostrado ser adecuada para capturar las complejidades del desacoplamiento, permitiéndonos tener una comprensión más completa de la relación entre el crecimiento económico y la degradación ambiental. A través de un análisis detallado, se ha demostrado que, aunque algunos países han logrado un desacoplamiento fuerte entre el crecimiento del PIB y las emisiones de CO₂, este fenómeno es menos común cuando se considera el consumo de materiales y, sobre todo, cuando se introduce la perspectiva basada en el consumo frente a la territorial.

Así, nuestro estudio confirma la hipótesis de que el crecimiento económico, en los países de ingreso alto, no se ha traducido en una tendencia generalizada de desacoplamiento absoluto respecto a la degradación ambiental. Si bien se ha comprobado que el desacoplamiento absoluto es factible en periodos de ralentización económica, sobre todo si se toma en cuenta la perspectiva territorial y no la basada en el consumo, tan sólo Alemania logra un desacoplamiento absoluto para los cuatro indicadores considerados en el conjunto del periodo de estudio.

El hecho de que la mayoría de los países de ingreso alto hayan presentado sus mejores resultados de desacoplamiento en el periodo de desaceleración económica que sigue a la Crisis de 2008, resalta la complejidad de lograr un desacoplamiento absoluto en un contexto de aceleración económica constante. Dado que toda actividad productiva requiere una cierta cantidad de factores de producción ecológicos que no pueden ser plenamente sustituidos por factores de producción humanos (herramientas, trabajo y

conocimiento), todo incremento del perímetro de la economía requiere de un mayor consumo de materiales y supone un aumento de la generación de residuos ambientales. Por ello, como resulta evidente, es mucho más sencillo que un país reduzca su carga ecológica con un menor nivel de agitación económica.

En general, en términos emisiones de CO₂ territoriales y de consumo doméstico de materiales se logra un mayor grado de desacoplamiento, llegando a alcanzarse en varios casos el desacoplamiento absoluto. Sin embargo, al utilizar las emisiones de CO₂ basadas en el consumo y, sobre todo, la huella material, el desacoplamiento absoluto se convierte en algo excepcional, siendo el desacoplamiento relativo la norma. Por tanto, se ha verificado que el desacoplamiento absoluto es posible, pero no uniforme entre los países ni consistente a través de diferentes indicadores ambientales. No obstante, también hemos observado que el número de países que han alcanzado un desacoplamiento absoluto se ha incrementado en el periodo 2006-2021 respecto de los anteriores, lo cual añade una nota de optimismo. Pero, como hemos apuntado anteriormente, dicho periodo se ha caracterizado por menores tasas de crecimiento económico, planteándonos el interrogante de si esta situación es exportable a un escenario de aceleración económica constante.

En gran medida esta divergencia entre los indicadores se explica por el hecho de que no miden lo mismo. Mientras que el consumo material interno y las emisiones de CO₂ territoriales miden la degradación ambiental ocurrida dentro de las propias fronteras, siendo una aproximación perfecta para el impacto ambiental local, la huella material y las emisiones de CO₂ basadas en el consumo miden la degradación ambiental asociada al consumo final. En un contexto de creciente globalización e internacionalización del capital estos segundos indicadores son la forma más adecuada de medir los impactos ambientales. Así, la divergencia entre los resultados de los indicadores territoriales y los basados en el consumo nos señalan que los países de ingreso alto trasladan una parte de sus cargas ambientales a terceros países menos desarrollados.

Además, los resultados han evidenciado que la divergencia entre el método territorial y el basado en el consumo es notablemente superior en el caso del consumo de materiales. Las emisiones de CO₂ pueden ser más fácilmente mitigadas a través los avances en la eficiencia energética y la transición a fuentes de energía renovable, contribuyendo a un mayor desacoplamiento. Sin embargo, estos factores pueden tener un impacto menor en el consumo de materiales, que está más ligado a los patrones de consumo y producción, ya que todo proceso productivo requiere la movilización de energía y materiales. Por ejemplo, la producción de bienes físicos requiere la extracción de una gran cantidad de recursos naturales y resulta en una gran cantidad de residuos, siendo el consumo de materiales más intensivo en términos de impacto ambiental.

Incluso los servicios de carácter digital e informáticos, que son los máximos exponentes de la economía desmaterializada, consumen una importante cantidad de recursos materiales y energéticos. Esto se debe a que la infraestructura necesaria para soportar estos servicios, como los centros de datos y las redes de comunicación, requieren una inversión significativa en términos de materiales y energía. Por lo tanto, incluso en una economía cada vez más digital, no podemos ignorar la huella material y energética de nuestras actividades.

Por otra parte, los resultados de procedentes del modelo derivado del STIRPAT, con el que se ha considerado la hipótesis de la Curva Ambiental de Kuznets, nos han mostrado una relación en forma de U invertida para el caso de las emisiones de CO₂ territorial y en forma de N para el consumo material doméstico y la huella material, lo cual refuerza la hipótesis de que no existe una tendencia generalizada entre los países de ingreso alto que los encamine inevitablemente hacia el desacoplamiento absoluto. Además, a través de los resultados de dicho modelo hemos podido confirmar también la importancia de disminuir el consumo de combustibles fósiles, así como de incrementar el consumo de energía renovable, para disminuir los impactos ambientales. Con lo cual, los resultados enfatizan la importancia de incrementar el despliegue de fuentes de energía renovable y abandono de los combustibles fósiles para lograr una reducción sostenible de la degradación ambiental.

Este estudio es relevante en el campo del desarrollo sostenible y la economía ambiental, ya que proporciona evidencia empírica de las complejas relaciones entre el crecimiento económico, el consumo de energía y el impacto ambiental. Las conclusiones obtenidas subrayan la necesidad de políticas que fomenten la innovación en tecnologías limpias y la eficiencia en el uso de recursos, especialmente en países del sur de Europa. Además, enfatizan la importancia de políticas que promuevan una transición justa hacia economías bajas en carbono y con una menor intensidad material, sin externalizar los impactos ambientales. Resaltando la importancia de considerar tanto la perspectiva territorial como la de consumo para obtener una imagen completa del impacto ambiental de un país. Además, plantea la dificultad de afrontar un reto global, como la emergencia climática, con el desacoplamiento como única estrategia para armonizar los objetivos económicos y ambientales. Lo cual sugiere que, en lugar de ver el crecimiento económico como la vía principal hacia la sostenibilidad ecológica y el bienestar humano, deberíamos explorar enfoques que no dependan del crecimiento económico constante. En última instancia, este trabajo contribuye al debate sobre cómo los países pueden equilibrar el crecimiento económico con la preservación del medio ambiente, ofreciendo insights valiosos para formuladores de políticas, investigadores y partes interesadas en la sostenibilidad global.

6. Bibliografía

- Agras, J. (1995). Environment and Development: An Economic Analysis of Pollution, Growth, and Trade. *Master's Thesis. Department of Agricultural, Resource, and Managerial Economics, Cornell University.*
- Alcott, B. (2005). Jevons' paradox. *Ecological Economics, Volume 54, Issue 1*, pp. 9-21. doi:10.1016/j.ecolecon.2005.03.020
- Allard, A., Takman, J., Uddin, G. S., & Ahmed, A. (2018). The N-shaped environmental Kuznets curve: an empirical evaluation using a panel quantile regression approach. *Environ Sci Pollut Res 25*, pp. 5848–5861. doi:10.1007/s11356-017-0907-0
- Al-mulali, U., Tang, C. F., & Ozturk, I. (2015). Estimating the Environment Kuznets Curve hypothesis: Evidence from Latin America and the Caribbean countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 50*, pp. 918-924. doi:10.1016/j.rser.2015.05.017
- Álvarez-Herranz, A., & Balsalobre-Lorente, D. (2015). Energy regulation in the EKC model with a dampening effect. *Int J Environ Anal Chem 2(3):1–10*, pp. 1-10. doi:10.4172/2380-2391.1000137
- Álvarez-Herranz, A., & Balsalobre-Lorente, D. (2016). Economic growth and energy regulation in the environmental Kuznets curve. *Environ Sci Pollut Res 23(16)*, pp. 16478–16494. doi:10.1007/s11356-016-6773-3
- Amado, N. B., & Sauer, I. L. (2012). An ecological economic interpretation of the Jevons effect. *Ecological Complexity, Volume 9*, pp. 2-9. doi:10.1016/j.ecocom.2011.10.003
- Andreoni, J., & Levinson, A. (2001). The simple analytics of the environmental Kuznets curve. *Journal of Public Economics, Volume 80, Issue 2*, pp. 269-286. doi:10.1016/S0047-2727(00)00110-9
- Apergis, N. (2016). Environmental Kuznets curves: New evidence on both panel and country-level CO2 emissions. *Energy Economics, Volume 54*, pp. 263-271. doi:10.1016/j.eneco.2015.12.007
- Apergis, N., & Ozturk, I. (2015). Testing Environmental Kuznets Curve hypothesis in Asian countries. *Ecological Indicators, Volume 52*, pp. 16-22. doi:10.1016/j.ecolind.2014.11.026
- Arrow, K., Bolin, B., Costanza, R., Dasgupta, P., Folke, C., Holling, C. S., . . . Pimentel, D. (1995). Economic Growth, Carrying Capacity, and the Environment. *Science, Volume 268, Issue 5210*, pp. 520-521. doi:10.1126/science.268.5210.520
- Arto, I., Roca, J., & Serrano, M. (2012). Emisiones territoriales y fuga de emisiones. Análisis del caso español. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica, vol. 18, num. 1*, pp. 73-87.

- Auty, R. M. (1985). Export Base Theory, Staple Flexibility and Tropical Regional Development. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 6, pp. 13-22. doi:10.1111/j.1467-9493.1985.tb00157.x
- Awam, A. M., & Azam, M. (2022). Evaluating the impact of GDP per capita on environmental degradation for G-20 economies: Does N-shaped environmental Kuznets curve exist? *Environ Dev Sustain* 24, 11103–11126. doi:10.1007/s10668-021-01899-8
- Ayres, R. U., & van den Bergh, J. (2005). A theory of economic growth with material/energy resources and dematerialization: Interaction of three growth mechanisms. *Ecological Economics*, vol. 55, issue 1, pp. 96-118. doi:10.1016/j.ecolecon.2004.07.023
- Azam, M., & Khan, A. Q. (2016). Urbanization and Environmental Degradation: Evidence from four SAARC Countries—Bangladesh, India, Pakistan, and Sri Lanka. *Environ. Prog. Sustainable Energy*, 35, pp. 823-832.
- Balaguer, J., & Cantavella, M. (2016). Estimating the environmental Kuznets curve for Spain by considering fuel oil prices (1874–2011). *Ecological Indicators*, Volume 60, pp. 853-859. doi:10.1016/j.ecolind.2015.08.006
- Bithas, K., & Kalimeris, P. (2018). Unmasking decoupling: Redefining the Resource Intensity of the Economy. *Sci. Total Environ.*, 619–620, pp. 338-351. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.11.061
- Chen, J., Wang, P., Cui, L., Shuo, H., & Song, M. (2018). Decomposition and decoupling analysis of CO2 emissions in OECD. *Applied Energy, Elsevier*, vol. 231(C), pp. 937-950. doi:10.1016/j.apenergy.2018.09.179
- Chen, T., & Hu, J.-L. (2007). Renewable energy and macroeconomic efficiency of OECD and non-OECD economies. *Energy Policy*, Volume 35, Issue 7, pp. 3606-3615. doi:10.1016/j.enpol.2006.12.033
- Cibulka, S., & Giljum, S. (2020). Towards a Comprehensive Framework of the Relationships between Resource Footprints, Quality of Life, and Economic Development. *Sustain*, 12, p. 4734. doi:10.3390/su12114734
- Cogoy, M. (2004). Dematerialisation, time allocation, and the service economy. *Structural Change and Economic Dynamics*, Volume 15, Issue 2, pp. 165-181. doi:10.1016/S0954-349X(03)00025-0
- Cohen, G., Jalles, J. T., Loungani, P., & Marto, R. (2018). The long-run decoupling of emissions and output: Evidence from the largest emitters. *Energy Policy*, Volume 118, pp. 58-68. doi:10.1016/j.enpol.2018.03.028
- Commoner, B. (1972). The environmental cost of economic growth. *Chemistry in Britain*, 8, , pp. 52-56.
- Cullenward, D., & Koomey, J. G. (2016). A critique of Saunders' 'historical evidence for energy efficiency rebound in 30 us sectors'. *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 103, pp. 203-213. doi:10.1016/j.techfore.2015.08.007

- Davis, G. F., & Kim, S. (2015). Financialization of the Economy. *Annual Review of Sociology*, 41(1), pp. 203-221. doi:10.1146/annurev-soc-073014-112402
- De Ville, F. (2018). Domestic Institutions and Global Value Chains: Offshoring in Germany's Core Industrial Sectors. *Global Policy*, Volume 9, Issue S2, p. 12-20. doi:10.1111/1758-5899.12610
- Declercq, B., Delarue, E., & D'haeseleer, W. (2011). Impact of the economic recession on the European power sector's CO2 emissions. *Energy Policy*, Volume 39, Issue 3, pp. 1677-1686. doi:10.1016/j.enpol.2010.12.043
- Dietz, T., & Rosa, E. A. (1994). Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology. *Human ecology review*, 1(2), pp. 277-300.
- Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey. *Ecological Economics*, Volume 49, Issue 4, pp. 431-455. doi:10.1016/j.ecolecon.2004.02.011
- Dittrich, M., Bringezu, S., & Schütz, H. (2012). The physical dimension of international trade, part 2: Indirect global resource flows between 1962 and 2005. *Ecological Economics*, Volume 79, pp. 32-43. doi:10.1016/j.ecolecon.2012.04.014
- Dong, F., Li, J., Zhang, X., & Zhu, J. (2021). Decoupling relationship between haze pollution and economic growth: A new decoupling index. *Ecological Indicators*, Volume 129, . doi:10.1016/j.ecolind.2021.107859
- EEA. (2018). Trends and Projections in Europe 2018. *Tracking Progress towards Europe's Climate and Energy Targets (No.16/2018)*. European Environmental Agency, Copenhagen.
- Ehrlich, P. R., & Holdren, J. P. (1971). Impact of Population Growth: Complacency concerning this component of man's predicament is unjustified and counterproductive. *Science*, Vol 171 (3977), pp. 1212-1217. doi:10.1126/science.171.3977.1212
- EU Commission. (2001). Environment 2010: Our Future, Our Choice. *Commun. Comm. Sixth Environ. Action Programme Eur. Community Adopt. Comm. On.*
- Fakher, H. A., Ahmed, Z., Acheampong, A. O., & Nathaniel, S. P. (2023). Renewable energy, nonrenewable energy, and environmental quality nexus: An investigation of the N-shaped Environmental Kuznets Curve based on six environmental indicators. *Energy*, Volume 263, Part A. doi:10.1016/j.energy.2022.125660
- Fang, Y. (2011). Economic welfare impacts from renewable energy consumption: The China experience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 15, Issue 9, pp. 5120-5128. doi:10.1016/j.rser.2011.07.044
- Feng, K., Davis, S., Sun, L., & Huabacek, K. (2015). Drivers of the US CO2 emissions 1997–2013. *Nat Commun* 6, 7714. doi:10.1038/ncomms8714
- Fischer-Kowalski, M., & Amann, C. (2001). Beyond IPAT and Kuznets Curves: Globalization as a Vital Factor in Analysing the Environmental Impact of Socio-

- Economic Metabolism. *Population and Environment* 23, pp. 7-47.
doi:10.1023/A:1017560208742
- Fix, B. (2019). Dematerialization Through Services: Evaluating the Evidence. *Biophysical Economics and Resource Quality*, pp. 1-17. doi:10.1007/s41247-019-0054-y
- Foster, V., Uju Dim, J., Vollmer, S., & Zhang, F. (2023). Understanding the challenge of decoupling transport-related CO2 emissions from economic growth in developing countries. *World Development Sustainability, Volume 3*. doi:10.1016/j.wds.2023.100111
- Frodyma, K., Papież, M., & Smiech, S. (2020). Decoupling economic growth from fossil fuel use—evidence from 141 countries in the 25-year perspective. *Energies*, 13, p. 6671. doi:10.3390/EN13246671
- García García, C., García García, C. B., Salmerón Gómez, R., & García Pérez, J. (2017). Regresión con variables ortogonales y regresión alzada en el modelo STIRPAT. *Estudios de economía aplicada*, Vol. 35, N° 3, pp. 717-734. doi:10.25115/eea.v35i3.2504
- Giljum, S., Dittrich, M., Lieber, M., & Lutter, S. (2014). Global Patterns of Material Flows and their Socio-Economic and Environmental Implications: A MFA Study on All Countries World-Wide from 1980 to 2009. *Resources*, pp. 319-339. doi:10.3390/resources3010319
- Greening, L. A., Greene, D. L., & Difiglio, C. (2000). Energy efficiency and consumption — the rebound effect — a survey. *Energy Policy, Volume 28, Issues 6–7*, pp. 389-401. doi:10.1016/S0301-4215(00)00021-5
- Grossman, G. M., & Krueger, A. (1995). Economic Growth and the Environment. *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 110, issue 2, pp. 353-377. doi:10.2307/2118443
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement. *NBER Working Papers 3914, National Bureau of Economic Research, Inc*. doi:10.3386/w3914
- Gyamfi, B. A., Adedoyin, F. F., Bein, M. A., & Bekun, F. V. (2021). Environmental implications of N-shaped environmental Kuznets curve for E7 countries. *Environ Sci Pollut Res* 28, pp. 33072–33082. doi:10.1007/s11356-021-12967-x
- Haberl, H., Wiedenhofer, D., Virág, D., Kalt, G., Plank, B., Brockway, P., . . . Creutzig, F. (2020). A systematic review of the evidence on decoupling of GDP, resource use and GHG emissions, part II: synthesizing the insights. *Environ. Res. Lett.*, 15. doi:10.1088/1748-9326/ab842a
- Hailemariam, A., & Erdiaw-Kwasie, M. O. (2022). Towards a circular economy: Implications for emission reduction and environmental sustainability. *Business Strategy and the Environmen*, 32 (4), 1951-1965. doi:10.1002/bse.3229

- Hardt, L., Owne, A., Brockway, P., Heun, M., Barrett, J., Taylor, P., & Foxon, T. (2018). Untangling the drivers of energy reduction in the UK productive sectors: Efficiency or offshoring? *Applied Energy*, 223, pp. 124-133. doi:10.1016/j.apenergy.2018.03.12
- Heckscher, E. (1919). The Effect of Foreign Trade on the Distribution of Income. *Ekonomisk Tidskrift*, 21, pp. 497-512.
- Heiskanen, E., & Jalas, M. (2000). Dematerialization through services: a review and evaluation of the debate. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/af335999-23e9-4f79-818f-125816d7f620/content
- Herring, H. (2006). Energy efficiency—a critical view. *Energy*, Volume 31, Issue 1, pp. 10-20. doi:10.1016/j.energy.2004.04.055
- Herring, H., & Roy, R. (2007). Technological innovation, energy efficient design and the rebound effect. *Technovation*, Volume 27, Issue 4, pp. 194-203. doi:10.1016/j.technovation.2006.11.004
- Hettige, H., Lucas, R. E., & Wheeler, D. (1992). The toxic intensity of industrial production: global patterns, trends, and trade policy. *The American Economic Review* 82, no. 2, pp. 478-481. Obtenido de <http://www.jstor.org/stable/2117448>
- Hickel, J., & Kallis, G. (2020). Is Green Growth Possible? *Econ*, 25, pp. 469-486. doi:10.1080/13563467.2019.1598964
- Holdren, J. P., & Ehrlich, P. R. (1974). Human Population and the Global Environment: Population growth, rising per capita material consumption, and disruptive technologies have made civilization a global ecological force. *American Scientist*, 62(3), pp. 282–292. Obtenido de <http://www.jstor.org/stable/27844882>
- Holtz-Ekain, D., & Selden, T. M. (1995). Stoking the fires? CO2 emissions and economic growth. *J. Public Econ.*, 57, pp. 85-101. doi:10.1016/0047-2727(94)01449-X
- Inglehart, R. (1977). *The silent revolution: changing values and political styles*. Princeton: Princeton University Press.
- IRP. (2017). *Assessing global resource use: A systems approach to resource efficiency and pollution reduction*. Nairobi, Kenya: A Report of the International Resource Panel. United Nations Environment Programme.
- Javid, M., & Sharif, F. (2016). Environmental Kuznets curve and financial development in Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 54, pp. 406-414. doi:10.1016/j.rser.2015.10.019
- Jevons, W. S. (1865). *The Coal Question: an enquiry concerning the progress of the Nation, and the probable exhaustion of our coal-mines*. London: Macmillan, ed.
- Jiborn, M., Kander, A., Kulionis, V., Nielsen, H., & Moran, D. D. (2018). Decoupling or delusion? Measuring emissions displacement in foreign trade. *Global*

- Environmental Change, Volume 49*, pp. 27-34.
doi:10.1016/j.gloenvcha.2017.12.006
- John, A., & Pecchenino, R. (1994). An Overlapping Generations Model of Growth and the Environment. *Economic Journal, 104*, issue 427, pp. 1393-1410.
doi:10.2307/2235455
- Jones, L., & Manuelli, R. (1995). A Positive Model of Growth and Pollution Controls. No 5205, *NBER Working Papers from National Bureau of Economic Research, Inc.* doi:10.3386/w5205
- Kan, S., Chen, B., & Chen, G. (2019). Worldwide energy use across global supply chains: Decoupled from economic growth? *Applied Energy, Volume 250*, pp. 1235-1245. doi:10.1016/j.apenergy.2019.05.104
- Kander, A., Jiborn, M., Moran, D. D., & Wiedmann, T. O. (2015). National greenhouse-gas accounting for effective climate policy on international trade. *Nature Clim Change 5*, pp. 431–435. doi:10.1038/nclimate2555
- Khazzoom, D. (1980). Economic Implications of Mandated Efficiency in Standards for Household Appliances. *The Energy Journal, Volume 1, issue Number 4*, pp. 21-40. doi:10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol1-No4-2
- Koirala, B. S., Li, H., & Berrens, R. P. (2011). Further Investigation of Environmental Kuznets Curve Studies Using Meta-Analysis. *J.Ecol.Stat. 22*, 13-32.
- Kovacic, Z., Spanò, M., Lo Piano, S., & Sorman, A. H. (2018). Finance, energy and the decoupling: an empirical study. *J Evol Econ 28*, pp. 565–590.
doi:10.1007/s00191-017-0514-8
- Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K.-H., Haberl, H., & Fischer-Kowalski, M. (2009). Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecol. Econ., 68*, pp. 2696-2705.
doi:10.1016/j.ecolecon.2009.05.007
- Krausmann, F., Lauk, C., Haas, W., & Wiedenhofer, D. (2018). From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900–2015. *Global Environmental Change, Volume 52*, pp. 131-140,. doi:10.1016/j.gloenvcha.2018.07.003
- Krausmann, F., Schandl, H., Eisenmenger, N., Giljum, S., & Jackson, T. (2017). Material Flow Accounting: Measuring Global Material Use for Sustainable Development. *Annu. Rev. Environ. Resour.* doi:10.1146/annurev-environ-102016-060726
- Kuznets, S. (2019 [1984]). Economic growth and income inequality. En *The gap between rich and poor* (págs. pp. 25-37). Routledge.
- Lean, H. H., & Smyth, R. (2010). CO2 emissions, electricity consumption and output in ASEAN. *Applied Energy, vol. 87, issue 6*, 1858-1864.
doi:10.1016/j.apenergy.2010.02.003

- Lenzen, M., Geschke, A., West, J., Fry, J., Malik, A., Giljum, S., . . . Schandl, H. (2022). Implementing the material footprint to measure progress towards Sustainable Development Goals 8 and 12. *Nat. Sustain.*, 5, pp. 157-166. doi:10.1038/s41893-021-00811-6
- Li, H., Berrens, R. P., & Grijalva, T. (2007). Economic growth and environmental quality: a meta-analysis of environmental Kuznets curve studies. *Economics Bulletin, AccessEcon*, vol. 17(5), pp.1-11.
- Longhofer, W., & Jorgenson, A. (2017). Decoupling reconsidered: Does world society integration influence the relationship between the environment and economic development? *Social Science Research, Volume 65*, 17-29. doi:10.1016/j.ssresearch.2017.02.002
- Madaleno, M., & Mountinho, V. (2018). Effects decomposition: separation of carbon emissions decoupling and decoupling effort in aggregated EU-15. *Environ Dev Sustain 20 (Suppl 1)*, pp. 181–198. doi:10.1007/s10668-018-0238-4
- Mardani, A., Streimikiene, D., Cavallaro, F., Loganathan, N., & Khoshnoudi, M. (2019). Carbon dioxide (CO₂) emissions and economic growth: A systematic review of two decades of research from 1995 to 2017. *Science of The Total Environment, Volume 649*, pp. 31-49. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.08.229
- Martinicio-Perez, M. F., Schandl, H., Fishman, T., & Tanikawa, H. (2018). The Socio-Economic Metabolism of an Emerging Economy: Monitoring Progress of Decoupling of Economic Growth and Environmental Pressures in the Philippines. *Ecol. Econ.*, 147, pp. 155-166. doi:10.1016/j.ecolecon.2018.01.012
- Mazzanti, M., & Zoboli, R. (2008). Waste generation, waste disposal and policy effectiveness: Evidence on decoupling from the European Union. *Resources, Conservation and Recycling, Volume 52, Issue 10*, pp. 1221-1234. doi:10.1016/j.resconrec.2008.07.003
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. (1972). *The Limits to Growth. A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York: Universe Books.
- Menegaki, A. N. (2011). Growth and renewable energy in Europe: A random effect model with evidence for neutrality hypothesis. *Energy Economics, Volume 33, Issue 2*, pp. 257-263. doi:10.1016/j.eneco.2010.10.004
- Mohammed, S., Gill, A. R., Ghosal, K., Al-Dalameh, M., Alsafadi, K., Szabó, S., . . . Harsanyi, E. (2024). Assessment of the environmental kuznets curve within EU-27: Steps toward environmental sustainability (1990–2019). *Environmental Science and Ecotechnology, Volume 18*. doi:10.1016/j.ese.2023.100312.
- Moomaw, W., & Unruh, G. (2001). Are environmental Kuznets curves misleading us? The case of CO₂ emissions. *Environment and Development Economics, Volume 2, Issue 4*, pp. 451 - 463. doi:10.1017/S1355770X97000247

- Moreau, V., & Vuille, F. (2018). Decoupling energy use and economic growth: Counter evidence from structural effects and embodied energy in trade. *Applied Energy, Volume 215*, pp. 54-62. doi:10.1016/j.apenergy.2018.01.044
- Moreau, V., Neves, C. A., & Vuille, F. (2019). Is decoupling a red herring? The role of structural effects and energy policies in Europe. *Energy Policy, Volume 128*, pp. 243-252. doi:10.1016/j.enpol.2018.12.028
- Naredo, J. M. (2015 [1987]). *La economía en evolución*. Madrid: Siglo XXI España.
- Nassani, A. A., Aldakhil, A. M., Qazi Abro, M. M., & Zaman, K. (2017). Environmental Kuznets curve among BRICS countries: Spot lightning finance, transport, energy and growth factors. *Journal of Cleaner Production, Volume 154*, pp. 474-487. doi:10.1016/j.jclepro.2017.04.025
- Nordhaus, W. D., & Samuelson, P. A. (2004). *Economía*. McGraw-Hill Companies.
- Numan, U., Ma, B., Meo, M. S., & Bedru, H. D. (2022). Revisiting the N-shaped environmental Kuznets curve for economic complexity and ecological footprint. *Journal of Cleaner Production, Volume 365*. doi:10.1016/j.jclepro.2022.132642
- OECD. (2002). Indicators to Measure Decoupling of Environmental Pressure from Economic Growth. Obtenido de <http://www.oilis.oecd.org/oilis/2002doc.nsf/LinkTo/sg-sd>
- Ohlin, B. (1971). *Comercio interregional e internacional*. Barcelona: Oikos-Tau, S. A.
- Panayotou, T. (1993). Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development. *ILO Working Papers, International Labour Organization*. Obtenido de <https://EconPapers.repec.org/RePEc:ilo:ilowps:992927783402676>
- Papież, M., Śmiech, S., Fródyma, K., & Borowiec, J. (2022). Decoupling is not enough. Evidence from fossil fuel use in over 130 countries. *Journal of Cleaner Production, 379*(Part 2). doi:10.1016/j.jclepro.2022.134856
- Parrique, T., Barth, J., Briens, F., Kerschhner, C., Kraus-Polk, A., Kuokkanen, A., & Spangenberg, J. (2019). Decoupling debunked: Evidence and arguments against green growth as a sole strategy for sustainability. *European Environmental Bureau*.
- Peters, G., & Hertwich, E. G. (2008). CO2 Embodied in International Trade with Implications for Global Climate Policy. *Environ. Sci. Technol., 42, 5*, 1401–1407. doi:10.1021/es072023k
- Piñero, P., Bruckner, M., Wieland, H., Pongrácz, E., & Giljum, S. (2019). The raw material basis of global value chains: allocating environmental responsibility based on value generation. *Economic Systems Research, 31*(2), pp. 206-227. doi:10.1080/09535314.2018.1536038
- Polimeni, J. M., Mayumi, K., Giampietro, M., & Alcott, B. (2008). *The Jevons paradox and the myth of resource efficiency improvements*. London: Earthscan.

- Raworth, K. (2018). *Doughnut economics: Seven ways to think like a 21st-century economist*. Random House Business Books.
- Roinioti, A., & Koroneos, C. (2017). The decomposition of CO2 emissions from energy use in Greece before and during the economic crisis and their decoupling from economic growth. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 76*, pp. 448-459.
- Salim, R. A., & Rafiq, S. (2012). Why do some emerging economies proactively accelerate the adoption of renewable energy? *Energy Economics, Volume 34, Issue 4*, pp. 1051-1057. doi:10.1016/j.eneco.2011.08.015
- Sarkodie, S. A., & Strezov, V. (2019). A review on Environmental Kuznets Curve hypothesis using bibliometric and meta-analysis. *Science of The Total Environment, Volume 649*, pp. 128-145. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.08.276
- Saunders, H. D. (2013). Historical evidence for energy efficiency rebound in 30 US sectors and a toolkit for rebound analysts. *Technological Forecasting and Social Change, Volume 80, Issue 7*, pp. 1317-1330. doi:10.1016/j.techfore.2012.12.007
- Saunders, H. D. (2017). Response to Cullenward and Koomey critique of ‘historical evidence for energy efficiency rebound in 30 US sectors’. *Technological Forecasting and Social Change, Volume 119*, pp. 184-193. doi:10.1016/j.techfore.2017.03.027
- Schandl, H., Hatfield-Dodds, S., O Wiedmann, T., Geschke, A., Cai, Y., West, J., . . . Owen, A. (2016). Decoupling global environmental pressure and economic growth: scenarios for energy use, materials use and carbon emissions. *J. Clean. Prod., 132*, pp. 45-56. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2015.06.100
- Schröder, E., & Storm, S. (2020). Economic Growth and Carbon Emissions: The Road to “Hothouse Earth” is Paved with Good Intentions. *International Journal of Political Economy, 49:2*, 153-173. doi:10.1080/08911916.2020.1778866
- Schüller, M., Estrada, A., & Bringezu, S. (2008). Mapping Environmental Performance of International Raw Material Production Flows: a Comparative Case Study for the Copper Industry of Chile and Germany. *Minerals & Energy - Raw Materials Report, 23(1)*, pp. 29-45. doi:10.1080/14041040701878488
- Schulz, N. B. (2010). Delving into the carbon footprints of Singapore--comparing direct and indirect greenhouse gas emissions of a small and open economic system. *Energy Policy, Elsevier, vol. 38(9)*, pp. 4848-4855.
- Schwan, M. (2017). Which roads lead to Wall Street? The financialization of regions in the European Union. *Comp Eur Polit 15*, pp. 661-683. doi:10.1057/s41295-017-0098-6
- Shafik, N., & Bandyopadhyay, S. (1992). Economic growth and environmental quality : time series and cross-country evidence. *Policy Research Working Paper Series 904, The World Bank*.

- Shao, Q., Schaffartzik, A., Mayer, A., & Krausmann, F. (2017). The high ‘price’ of dematerialization: a dynamic panel data analysis of material use and economic recession. *J. Clean. Prod.*, 167, pp. 120-132. doi:10.1016/j.jclepro.2017.08.158
- Shezad, K., Zeraibi, A., & Zaman, U. (2022). Testing the N-shaped environmental Kuznets Curve in Algeria: An imperious role of natural resources and economic globalization. *Resources Policy, Volume 77*. doi:10.1016/j.resourpol.2022.102700
- Shouwu, J., Xu, T., Shezad, K., Zaman, B. U., & Wuyue, L. (2024). The role of environmental technologies and clean energy transition in shaping the N-shaped environmental Kuznets curve: A North African perspective. *Environmental Technology & Innovation, Volume 33*. doi:10.1016/j.eti.2023.103463
- Smith, M., Hargreaves, K. ", & Desha, C. (2010). *Cents and Sustainability: Securing Our Common Future by Decoupling Economic Growth from Enviromental Pressures*. London: Earthscan/Routledge.
- Song, Y., Sun, J., Zhang, M., & Su, B. (2020). Using the Tapio-Z decoupling model to evaluate the decoupling status of China's CO2 emissions at provincial level and its dynamic trend. *Structural Change and Economic Dynamics, Volume 52*, pp. 120-129. doi:10.1016/j.strueco.2019.10.004
- Sorrell, S., Dimitropoulos, J., & Sommerville, M. (2009). Empirical estimates of the direct rebound effect: A review. *Energy Policy, Volume 37, Issue 4*, pp. 1356-1371. doi:10.1016/j.enpol.2008.11.026
- Steinberger, J., Krausmann, F., Getzner, M., & West, J. (2013). Development and Dematerialization: An International Study. *PLoS One*, 8. doi:10.1371/journal.pone.0070385
- Stern, D. I. (2004). The Rise and Fall of the Environmental Kuznets Curve. *World Development, Volume 32, Issue 8*, pp. 1419-1439. doi:10.1016/j.worlddev.2004.03.004
- Stern, D. I., Common, M. S., & Barbier, E. B. (1996). Economic growth and environmental degradation: The environmental Kuznets curve and sustainable development. *World Development, Volume 24, Issue 7*, pp. 1151-1160. doi:10.1016/0305-750X(96)00032-0
- Stern, D. I., Gerlagh, R., & Burke, P. J. (2017). Modeling the emissions–income relationship using long-run growth rates. *Environment and Development Economics. 2017;22(6)*, pp. 699-724. doi:10.1017/S1355770X17000109
- Stokey, N. (1998). Are There Limits to Growth? *International Economic Review, 1998, vol. 39, issue 1*, pp. 1-31. doi:10.2307/2527228
- Suri, V., & Chapman, D. (1998). Economic growth, trade and energy: implications for the environmental Kuznets curve. *Ecological Economics, Volume 25, Issue 2*, pp. 195-208. doi:10.1016/S0921-8009(97)00180-8

- Tapio, P. (2005). Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001. *Transport policy*, 2005, vol. 12, no 2, pp. 137-151. doi:10.1016/j.tranpol.2005.01.001
- Tiwari, A. K. (2011). A structural VAR analysis of renewable energy consumption, real GDP and CO2 emissions: evidence from India. *Economics Bulletin* 31.2, pp.1793-1806.
- Torras, M., & Boyce, J. K. (1998). Income, inequality, and pollution: a reassessment of the environmental Kuznets Curve. *Ecological Economics*, Volume 25, Issue 2, pp. 147-160. doi:10.1016/S0921-8009(97)00177-8
- Tugcu, C. T., Ozturk, I., & Aslan, A. (2012). Renewable and non-renewable energy consumption and economic growth relationship revisited: Evidence from G7 countries. *Energy Economics*, Volume 34, Issue 6, pp. 1942-1950. doi:10.1016/j.eneco.2012.08.021
- UNEP. (2011a). Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication. *Sustainable Development Knowledge Platform*.
- UNEP. (2011b). Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth. *UNEP/Earthprint*.
- UNEP. (2014). *Decoupling 2: Technologies, Opportunities and Policy options. A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel*. UNEP.
- UNEP. (2022). *Global Material Flows Database*. Obtenido de <https://www.resourcepanel.org/global-material-flows-database>
- Van Caneghem, J., Block, C., Cramm, P., Mortier, R., & Vandecasteele, C. (2010). Improving eco-efficiency in the steel industry: The ArcelorMittal Gent case. *Journal of Cleaner Production*, Volume 18, Issue 8, pp. 807-814. doi:10.1016/j.jclepro.2009.12.016
- van den Lindt, M., Emmert, S., Tukker, A., Anger-Kraavi, A., Neuhoff, K., Blachowicz, A., . . . Crawford-Brown, D. (2017). Report: Carbon-CAP Findings. *Clim. Strateg.* Retrieved from <https://climatestrategies.org/publication/carbon-cap-final-report/>
- Vogel, J., & Hickel, J. (septiembre de 2023). Is green growth happening? An empirical analysis of achieved versus Paris-compliant CO2–GDP decoupling in high-income countries. *Lancet Planet Health*, Vol 7, Issue 9, E759-E769. doi:10.1016/S2542-5196(23)00174-2
- Vollebergh, H. R., Melenberg, B., & Dijkgraaf, E. (2009). Identifying reduced-form relations with panel data: The case of pollution and income. *Journal of Environmental Economics and Management*, Volume 58, Issue 1, pp. 27-47. doi:10.1016/j.jeem.2008.12.005

- Wagner, M. (2008). The carbon Kuznets curve: A cloudy picture emitted by bad econometrics? *Resource and Energy Economics, Volume 30, Issue 3*, pp. 388-408. doi:10.1016/j.reseneeco.2007.11.001
- Wang, H., Hashimoto, S., Yue, Q., Moriguchi, Y., & Lu, Z. (2013). Decoupling Analysis of Four Selected Countries. China, Russia, Japan, and the United States during 2000–2007. *J. Ind. Ecol., 17*, pp. 618-629. doi:10.1111/jiec.12005
- Wang, H., Zhao, S., Wei, Y., Yue, Q., & Du, T. (2018). Measuring the Decoupling Progress in Developed and Developing Countries. *Presented at the 8th International Conference on Management and Computer Science (ICMCS 2018), Atlantis Press*. doi:10.2991/icmcs-18.2018.77
- Wang, Q., & Wang, S. (2019). A comparison of decomposition the decoupling carbon emissions from economic growth in transport sector of selected provinces in eastern, central and western China. *J. Clean. Prod., 229*, pp. 570-581. doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.375
- Wang, Q., Jiang, R., & Zhan, L. (2019). Is decoupling economic growth from fuel consumption possible in developing countries? – A comparison of China and India. *Journal of Cleaner Production, Volume 229*, pp. 806-817. doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.403
- Wang, Y., Zhang, C., Lu, A., Li, L., He, Y., Tojo, J., & Zhu, X. (2017). A disaggregated analysis of the environmental Kuznets curve for industrial CO₂ emissions in China. *Applied Energy, Volume 190*, pp. 172-180. doi:10.1016/j.apenergy.2016.12.109
- Warr, B., & Ayres, R. U. (2012). Useful work and information as drivers of economic growth. *Ecological Economics, Volume 73*, pp. 93-102. doi:10.1016/j.ecolecon.2011.09.006
- Wiedmann, T., Schandl, H., Lenzen, M., & Kanemoto, K. (2015). The material footprint of nations. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 112*, pp. 6271-6276. doi:10.1073/pnas.1220362110
- Wood, R., Grubb, M., Anger-Kraavi, A., Pollitt, H., Alexandri, E., Stadler, K., . . . Tukker, A. (2020). Beyond peak emission transfers: historical impacts of globalization and future impacts of climate policies on international emission transfers. *Climate Policy, 20:sup1*, pp. 14-27. doi:10.1080/14693062.2019.1619507
- Wood, R., Stadler, K., Simas, M., Bulavskaya, T., Giljum, S., & Lutter, S. (2018). Growth in Environmental Footprints and Environmental Impacts Embodied in Trade: Resource Efficiency Indicators from EXIOBASE3. *J. Ind. Ecol., 22*, pp. 553-564. doi:10.1111/jiec.12735
- World Bank. (2012). Inclusive Green Growth: The Pathway to Sustainable Development. *The World Bank*. doi:10.1596/978-0-8213-9551-6

- Wu, Z., Schaffartzik, A., Shao, Q., Wang, D., Li, G., Su, Y., & Rao, L. (2019). Does economic recession reduce material use? Empirical evidence based on 157 economies worldwide. *J. Clean. Prod.*, 214, pp. 823-836.
doi:10.1016/j.jclepro.2019.01.015
- Yao, S., Zhang, S., & Zhang, X. (2019). Renewable energy, carbon emission and economic growth: A revised environmental Kuznets Curve perspective. *Journal of Cleaner Production*, Volume 235,, pp. 1338-1352.
doi:10.1016/j.jclepro.2019.07.069
- York, R., Rosa, E. A., & Dietz, T. (2003). STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological Economics*, Volume 46, Issue 3,, Pages 351-365. doi:10.1016/S0921-8009(03)00188-5

7. Anexo

Tabla 15. Resultados del índice de desacoplamiento de Tapio para las emisiones de CO₂ territorial con tres subperíodos.

	1970-1987				1988-2005				2006-2021			
	PIB	CO ₂ t	ID		PIB	CO ₂ t	ID		PIB	CO ₂ t	ID	
Alemania	0,483	0,009	0,018	DD	0,288	-0,187	-0,649	DF	0,169	-0,247	-1,463	DF
Australia	0,268	0,229	0,855	AE	0,437	0,314	0,719	DD	0,149	-0,222	-1,493	DF
Austria	0,567	0,117	0,206	DD	0,411	0,377	0,919	AE	0,059	-0,204	-3,478	DF
Bélgica	0,490	-0,205	-0,418	DF	0,384	0,188	0,489	DD	0,105	-0,296	-2,817	DF
Canadá	0,447	0,024	0,054	DD	0,283	0,050	0,176	DD	0,065	-0,194	-2,988	DF
Chile	0,120	-0,297	-2,469	DF	1,088	0,835	0,768	DD	0,314	0,165	0,525	DD
Corea del Sur	2,703	1,653	0,611	DD	1,610	1,122	0,697	DD	0,477	0,134	0,282	DD
Dinamarca	0,433	-0,098	-0,225	DF	0,344	-0,117	-0,339	DF	0,103	-0,536	-5,216	DF
EE. UU.	0,455	-0,071	-0,157	DF	0,390	-0,009	-0,023	DF	0,151	-0,260	-1,730	DF
España	0,458	0,417	0,912	AE	0,496	0,656	1,324	DNE	-0,014	-0,401	28,96	DR
Finlandia	0,659	0,332	0,503	DD	0,427	0,033	0,078	DD	0,047	-0,472	-9,946	DF
Francia	0,467	-0,235	-0,504	DF	0,308	-0,003	-0,009	DF	0,061	-0,287	-4,719	DF
Grecia	0,363	1,210	3,330	DNE	0,460	0,547	1,189	AE	-0,189	-0,456	2,415	DR
Irlanda	0,568	0,303	0,533	DD	1,481	0,368	0,248	DD	0,782	-0,330	-0,422	DF
Italia	0,593	0,207	0,349	DD	0,274	0,267	0,977	AE	-0,052	-0,331	6,305	DR
Japón	0,736	0,013	0,018	DD	0,272	0,258	0,949	AE	0,065	-0,140	-2,158	DF
Luxemburgo	0,527	-0,412	-0,783	DF	0,734	0,066	0,090	DD	0,046	-0,477	-10,47	DF
Noruega	0,842	0,099	0,117	DD	0,505	0,107	0,211	DD	0,041	-0,193	-4,671	DF
Países Bajos	0,319	-0,051	-0,160	DF	0,457	0,109	0,238	DD	0,122	-0,246	-2,012	DF
Portugal	0,592	0,774	1,307	DNE	0,465	1,037	2,229	DNE	0,067	-0,369	-5,507	DF
Reino Unido	0,477	-0,142	-0,298	DF	0,431	-0,057	-0,132	DF	0,050	-0,447	-8,969	DF
Suecia	0,362	-0,385	-1,063	DF	0,356	-0,122	-0,343	DF	0,145	-0,376	-2,592	DF

Fuente: elaboración propia.

Tabla 16. Resultados del índice de desacoplamiento de Tapio para las emisiones de CO₂ basadas en el consumo con tres subperíodos.

	1970-1987				1988-2005				2006-2021			
	PIB	CO ₂ C	ID		PIB	CO ₂ C	ID		PIB	CO ₂ C	ID	
Alemania	0,483	0,009	0,018	DD	0,288	-0,015	-0,051	DF	0,169	-0,225	-1,331	DF
Australia	0,268	0,229	0,855	AE	0,437	0,171	0,391	DD	0,149	-0,250	-1,678	DF
Austria	0,567	0,117	0,206	DD	0,411	0,859	2,093	DNE	0,059	-0,258	-4,401	DF
Bélgica	0,490	-0,205	-0,418	DF	0,384	1,139	2,969	DNE	0,105	-0,195	-1,851	DF
Canadá	0,447	0,024	0,054	DD	0,283	0,112	0,396	DD	0,065	-0,257	-3,949	DF
Chile	0,120	-0,297	-2,469	DF	1,088	0,826	0,759	DD	0,314	0,237	0,756	DD
Corea del Sur	2,703	1,653	0,611	DD	1,610	1,474	0,915	AE	0,477	0,052	0,110	DD
Dinamarca	0,433	-0,098	-0,225	DF	0,344	0,146	0,423	DD	0,103	-0,400	-3,895	DF
EE. UU.	0,455	-0,071	-0,157	DF	0,390	0,087	0,222	DD	0,151	-0,261	-1,734	DF
España	0,458	0,417	0,912	AE	0,496	0,849	1,713	DNE	-0,014	-0,388	28,04	DR

Finlandia	0,659	0,332	0,503	DD	0,427	0,463	1,084	AE	0,047	-0,452	-9,519	DF
Francia	0,467	-0,235	-0,504	DF	0,308	0,322	1,045	AE	0,061	-0,287	-4,712	DF
Grecia	0,363	1,210	3,330	DNE	0,460	0,271	0,590	DD	-0,189	-0,436	2,313	DR
Irlanda	0,568	0,303	0,533	DD	1,481	1,062	0,717	DD	0,782	-0,452	-0,578	DF
Italia	0,593	0,207	0,349	DD	0,274	0,561	2,050	DNE	-0,052	-0,332	6,339	DR
Japón	0,736	0,013	0,018	DD	0,272	0,505	1,857	DNE	0,065	-0,171	-2,640	DF
Luxemburgo	0,527	-0,412	-0,783	DF	0,734	0,273	0,372	DD	0,046	-0,564	-12,39	DF
Noruega	0,842	0,099	0,117	DD	0,505	0,129	0,256	DD	0,041	-0,226	-5,482	DF
Países Bajos	0,319	-0,051	-0,160	DF	0,457	0,348	0,762	DD	0,122	-0,337	-2,758	DF
Portugal	0,592	0,774	1,307	DNE	0,465	2,762	5,940	DNE	0,067	-0,562	-8,384	DF
Reino Unido	0,477	-0,142	-0,298	DF	0,431	0,241	0,558	DD	0,050	-0,385	-7,719	DF
Suecia	0,362	-0,385	-1,063	DF	0,356	0,488	1,368	DNE	0,145	-0,359	-2,474	DF

Fuente: elaboración propia.

Tabla 17. Resultados del índice de desacoplamiento de Tapio para el consumo material doméstico con tres subperíodos.

	1970-1987				1988-2005				2006-2021			
	PIB	CMD	ID		PIB	CMD	ID		PIB	CMD	ID	
Alemania	0,483	-0,077	-0,160	DF	0,288	-0,137	-0,476	DF	0,169	-0,084	-0,498	DF
Australia	0,268	0,073	0,274	DD	0,437	0,178	0,406	DD	0,149	-0,152	-1,022	DF
Austria	0,567	0,120	0,211	DD	0,411	0,109	0,266	DD	0,059	-0,306	-5,234	DF
Bélgica	0,490	-0,186	-0,379	DF	0,384	-0,258	-0,674	DF	0,105	-0,193	-1,838	DF
Canadá	0,447	0,209	0,469	DD	0,283	-0,020	-0,072	DF	0,065	0,044	0,678	DD
Chile	0,120	0,407	3,378	DNE	1,088	2,418	2,223	DNE	0,314	-0,007	-0,022	DF
Corea del Sur	2,703	1,443	0,534	DD	1,610	0,644	0,400	DD	0,477	0,112	0,234	DD
Dinamarca	0,433	-0,116	-0,268	DF	0,344	0,457	1,326	DNE	0,103	-0,179	-1,738	DF
EE. UU.	0,455	-0,013	-0,028	DF	0,390	0,063	0,161	DD	0,151	-0,261	-1,734	DF
España	0,458	0,225	0,491	DD	0,496	0,690	1,392	DNE	-0,014	-0,604	43,58	DR
Finlandia	0,659	-0,041	-0,063	DF	0,427	0,542	1,270	DNE	0,047	-0,253	-5,335	DF
Francia	0,467	-0,192	-0,410	DF	0,308	0,009	0,030	DD	0,061	-0,102	-1,674	DF
Grecia	0,363	0,467	1,286	DNE	0,460	0,325	0,707	DD	-0,189	-0,660	3,498	DR
Irlanda	0,568	-0,021	-0,036	DF	1,481	1,643	1,109	AE	0,782	-0,654	-0,836	DF
Italia	0,593	0,153	0,257	DD	0,274	0,006	0,023	DD	-0,052	-0,431	8,216	DR
Japón	0,736	0,359	0,488	DD	0,272	-0,123	-0,454	DF	0,065	-0,121	-1,873	DF
Luxemburgo	0,527	-0,504	-0,958	DF	0,734	0,659	0,898	AE	0,046	0,665	14,60	DNE
Noruega	0,842	1,407	1,672	DNE	0,505	0,748	1,481	DNE	0,041	-0,079	-1,920	DF
Países Bajos	0,319	-0,027	-0,086	DF	0,457	-0,314	-0,688	DF	0,122	-0,214	-1,750	DF
Portugal	0,592	0,647	1,092	AE	0,465	0,958	2,060	DNE	0,067	-0,407	-6,081	DF
Reino Unido	0,477	0,013	0,027	DD	0,431	-0,163	-0,377	DF	0,050	-0,037	-0,751	DF
Suecia	0,362	-0,092	-0,254	DF	0,356	0,348	0,976	AE	0,145	0,040	0,276	DD

Fuente: elaboración propia.

Tabla 18. Resultados del índice de desacoplamiento de Tapio para la huella material con tres subperíodos.

	1970-1987				1988-2005				2006-2021			
	PIB	HM	ID		PIB	HM	ID		PIB	HM	ID	
Alemania	0,483	0,167	0,345	DD	0,288	-0,109	-0,376	DF	0,169	-0,151	-0,893	DF
Australia	0,268	-0,037	-0,137	DF	0,437	0,293	0,670	DD	0,149	-0,328	-2,206	DF
Austria	0,567	0,268	0,472	DD	0,411	0,131	0,320	DD	0,059	-0,029	-0,488	DF
Bélgica	0,490	0,113	0,231	DD	0,384	0,146	0,381	DD	0,105	-0,130	-1,240	DF
Canadá	0,447	0,170	0,382	DD	0,283	0,141	0,497	DD	0,065	-0,141	-2,169	DF
Chile	0,120	-0,314	-2,610	DF	1,088	0,855	0,786	DD	0,314	0,236	0,753	DD
Corea del Sur	2,703	0,636	0,235	DD	1,610	0,989	0,614	DD	0,477	0,001	0,002	DD
Dinamarca	0,433	0,165	0,381	DD	0,344	0,690	2,006	DNE	0,103	-0,201	-1,958	DF
EE. UU.	0,455	-0,039	-0,086	DF	0,390	0,257	0,660	DD	0,151	-0,188	-1,252	DF
España	0,458	0,295	0,644	DD	0,496	0,732	1,476	DNE	-0,014	-0,484	34,91	DR
Finlandia	0,659	0,292	0,444	DD	0,427	0,269	0,630	DD	0,047	-0,146	-3,078	DF
Francia	0,467	0,039	0,083	DD	0,308	0,163	0,528	DD	0,061	-0,153	-2,508	DF
Grecia	0,363	0,286	0,786	DD	0,460	0,532	1,156	AE	-0,189	-0,498	2,639	DR
Irlanda	0,568	0,174	0,307	DD	1,481	1,745	1,179	AE	0,782	-0,559	-0,715	DF
Italia	0,593	0,317	0,534	DD	0,274	0,206	0,754	DD	-0,052	-0,357	6,811	DR
Japón	0,736	0,576	0,782	AE	0,272	-0,115	-0,422	DF	0,065	-0,127	-1,962	DF
Luxemburgo	0,527	-0,114	-0,216	DF	0,734	0,574	0,783	DD	0,046	0,216	4,742	DNE
Noruega	0,842	0,321	0,381	DD	0,505	0,501	0,991	AE	0,041	-0,138	-3,346	DF
Países Bajos	0,319	0,254	0,797	DD	0,457	0,213	0,466	DD	0,122	-0,051	-0,421	DF
Portugal	0,592	0,314	0,530	DD	0,465	0,664	1,429	DNE	0,067	-0,347	-5,176	DF
Reino Unido	0,477	0,157	0,330	DD	0,431	0,147	0,340	DD	0,050	-0,193	-3,882	DF
Suecia	0,362	-0,021	-0,058	DF	0,356	0,097	0,271	DD	0,145	0,095	0,652	DD

Fuente: elaboración propia.

Tabla 19. Resultados para la elasticidad ecológica de las emisiones de CO2 territorial con tres subperíodos.

	1970-1987					1988-2005					2006-2021				
	EE	σ	Est. t	Valor p	R ²	EE	σ	Est. t	Valor p	R ²	EE	σ	Est. t	Valor p	R ²
Alemania	0,042	0,060	0,694	0,4977	0,029	-0,819	0,081	-10,10	2,39e-08 ***	0,864	-1,115	0,311	-3,588	0,0030 ***	0,479
Australia	0,985	0,099	9,932	3,02e-08 ***	0,860	0,612	0,048	12,69	9,16e-010 ***	0,910	-1,582	0,164	-9,668	1,42e-07 ***	0,870
Austria	0,012	0,092	0,134	0,8952	0,001	0,741	0,102	7,298	1,79e-06 ***	0,769	-1,283	0,756	-1,698	0,1116	0,171
Bélgica	-0,613	0,202	-3,028	0,0080 ***	0,364	0,267	0,127	2,107	0,0512 *	0,217	-2,453	0,764	-3,212	0,0063 ***	0,424
Canadá	-0,008	0,096	-0,086	0,9329	0,000	0,410	0,043	9,454	5,96e-08 ***	0,848	-1,058	0,514	-2,061	0,0584 *	0,233
Chile	-0,207	0,475	-0,435	0,6694	0,012	0,910	0,101	9,024	1,12e-07 ***	0,836	0,579	0,100	5,778	4,79e-05 ***	0,705
Corea del Sur	0,818	0,044	18,53	3,10e-012 ***	0,955	0,795	0,051	15,55	4,45e-011 ***	0,938	0,372	0,111	3,354	0,0047 ***	0,446
Dinamarca	-0,226	0,162	-1,399	0,181	0,109	-0,255	0,245	-1,042	0,3128	0,064	-3,585	1,107	-3,237	0,0060 ***	0,428
EE. UU.	-0,330	0,109	-3,037	0,0079 ***	0,366	0,045	0,045	1,637	0,1211	0,144	-1,506	0,335	-4,491	0,0005 ***	0,590
España	1,179	0,219	5,389	6,03e-05 ***	0,645	1,048	0,054	19,32	1,63e-012 ***	0,959	1,256	0,918	1,369	0,1926	0,118
Finlandia	0,201	0,173	1,156	0,2646	0,077	0,256	0,120	2,144	0,0477 **	0,223	-0,965	1,725	-0,560	0,5846	0,022
Francia	-0,832	0,209	-3,984	0,0011 ***	0,498	-0,050	0,069	-0,717	0,4835	0,031	-2,178	0,973	-2,239	0,0419 **	0,264
Grecia	2,096	0,164	12,80	8,01e-010 ***	0,911	0,794	0,096	8,288	3,49e-07 ***	0,811	1,482	0,275	5,382	9,67e-05 ***	0,674
Irlanda	0,268	0,087	3,067	0,0074 ***	0,370	0,357	0,026	13,83	2,57e-010 ***	0,923	-0,353	0,127	-2,777	0,0148 **	0,355
Italia	0,254	0,068	3,737	0,0018 ***	0,466	0,755	0,070	10,82	9,12e-09 ***	0,880	2,970	0,542	5,478	8,14e-05 ***	0,682
Japón	-0,069	0,060	-1,149	0,2673	0,076	0,965	0,103	9,374	6,70e-08 ***	0,846	-0,661	0,424	-1,557	0,1418	0,142
Luxemburgo	-1,405	0,295	-4,756	0,0002 ***	0,586	-0,473	0,245	-1,927	0,0720 *	0,188	0,337	2,578	0,131	0,8978	0,001
Noruega	0,187	0,061	3,059	0,0075 ***	0,369	0,469	0,051	9,146	9,37e-08 ***	0,839	-1,854	0,797	-2,326	0,0355 **	0,279
Países Bajos	-0,306	0,323	-0,948	0,3575	0,053	0,056	0,067	0,832	0,4177	0,041	-1,893	0,524	-3,614	0,0028 ***	0,483
Portugal	1,325	0,093	14,32	1,54e-010 ***	0,928	1,498	0,113	13,27	4,73e-010 ***	0,917	-0,267	0,769	-0,347	0,7336	0,009
Reino Unido	-0,530	0,117	-4,533	0,0003 ***	0,562	-0,239	0,036	-6,592	6,19e-06 ***	0,731	-2,540	1,236	-2,055	0,0591 *	0,232
Suecia	-1,729	0,223	-7,748	8,37e-07 ***	0,790	-0,325	0,057	-5,664	3,52e-05 ***	0,667	-2,759	0,505	-5,463	8,36e-05 ***	0,681

Tabla 20. Resultados para elasticidad ecológica de las emisiones de CO2 basadas en el consumo tres subperíodos.

	1970-1987					1988-2005					2006-2021				
	EE	σ	Est. t	Valor p	R ²	EE	σ	Est. t	Valor p	R ²	EE	σ	Est. t	Valor p	R ²
Alemania	0,042	0,060	0,694	0,4977	0,029	-0,286	0,161	-1,776	0,0947 *	0,165	-1,391	0,250	-5,568	6,92e-05 ***	0,689
Australia	0,985	0,099	9,932	3,02e-08 ***	0,860	0,499	0,059	8,407	2,90e-07 ***	0,815	-2,053	0,279	-7,359	3,57e-06 ***	0,795
Austria	0,012	0,092	0,134	0,8952	0,001	1,087	0,306	3,553	0,0026 ***	0,441	-1,900	1,021	-1,861	0,0839 *	0,198
Bélgica	-0,613	0,202	-3,028	0,0080 ***	0,364	1,637	0,255	6,411	8,62e-06 ***	0,720	-1,606	0,657	-2,443	0,0284 **	0,299
Canadá	-0,008	0,096	-0,086	0,9329	0,000	0,343	0,047	7,241	1,97e-06 ***	0,766	-2,631	0,681	-3,865	0,0017 ***	0,516
Chile	-0,207	0,475	-0,435	0,6694	0,012	0,889	0,091	9,725	4,05e-08 ***	0,855	0,799	0,172	4,651	0,0004 ***	0,607
Corea del Sur	0,818	0,044	18,53	3,10e-012 ***	0,955	0,765	0,100	7,638	1,01e-06 ***	0,785	0,136	0,077	1,752	0,1017	0,180
Dinamarca	-0,226	0,162	-1,399	0,181	0,109	0,271	0,197	1,378	0,1872	0,106	-2,261	0,911	-2,483	0,0263 **	0,306
EE. UU.	-0,330	0,109	-3,037	0,0079 ***	0,366	0,351	0,042	8,325	3,30e-07 ***	0,812	-1,294	0,372	-3,480	0,0037 ***	0,464
España	1,179	0,219	5,389	6,03e-05 ***	0,645	1,072	0,117	9,170	9,04e-08 ***	0,840	1,393	0,991	1,405	0,1819	0,124
Finlandia	0,201	0,173	1,156	0,2646	0,077	0,133	0,267	0,496	0,6264	0,015	-0,428	1,860	-0,230	0,8215	0,004
Francia	-0,832	0,209	-3,984	0,0011 ***	0,498	0,447	0,202	2,218	0,0414 **	0,235	-2,581	1,105	-2,335	0,0349 **	0,280
Grecia	2,096	0,164	12,80	8,01e-010 ***	0,911	0,081	0,207	0,392	0,6999	0,010	1,877	0,269	6,970	6,55e-06 ***	0,776
Irlanda	0,268	0,087	3,067	0,0074 ***	0,370	0,626	0,065	9,627	4,65e-08 ***	0,853	-0,391	0,202	-1,941	0,0727 *	0,212
Italia	0,254	0,068	3,737	0,0018 ***	0,466	0,915	0,300	3,051	0,0076 ***	0,368	3,006	0,647	4,644	0,0004 ***	0,606
Japón	-0,069	0,060	-1,149	0,2673	0,076	1,724	0,239	7,227	2,02e-06 ***	0,765	-1,415	0,459	-3,081	0,0081 ***	0,404
Luxemburgo	-1,405	0,295	-4,756	0,0002 ***	0,586	-0,323	0,281	-1,149	0,2674	0,076	1,284	3,304	0,389	0,7035	0,011
Noruega	0,187	0,061	3,059	0,0075 ***	0,369	0,473	0,050	9,380	6,64e-08 ***	0,846	-2,228	1,076	-2,070	0,0574 *	0,234
Países Bajos	-0,306	0,323	-0,948	0,3575	0,053	-0,801	0,387	-2,071	0,0548 *	0,211	-2,678	0,846	-3,166	0,0069 ***	0,417
Portugal	1,325	0,093	14,32	1,54e-010 ***	0,928	3,069	0,128	23,89	6,08e-014 ***	0,973	0,018	2,124	0,008	0,9934	0,000
Reino Unido	-0,530	0,117	-4,533	0,0003 ***	0,562	0,388	0,088	4,396	0,0005 ***	0,547	-1,731	1,091	-1,587	0,1349	0,152
Suecia	-1,729	0,223	-7,748	8,37e-07 ***	0,790	0,141	0,288	0,490	0,6308	0,015	-2,599	0,587	-4,427	0,0006 ***	0,583

Tabla 21. Resultados para la elasticidad ecológica del consumo material doméstico con tres subperíodos.

	1970-1987					1988-2005					2006-2021				
	EE	σ	Est. t	Valor p	R ²	EE	σ	Est. t	Valor p	R ²	EE	σ	Est. t	Valor p	R ²
Alemania	-0,187	0,044	-4,237	0,0006 ***	0,529	-0,328	0,281	-1,170	0,259	0,079	-0,431	0,202	-2,129	0,0515 *	0,245
Australia	-0,055	0,124	-0,446	0,6616	0,012	0,357	0,059	6,077	1,60e-05 ***	0,698	-0,814	0,242	-3,368	0,0046 ***	0,448
Austria	0,103	0,074	1,396	0,182	0,109	0,036	0,114	0,315	0,7569	0,006	-2,868	1,327	-2,162	0,0484 **	0,250
Bélgica	-0,754	0,190	-3,961	0,0011 ***	0,495	-0,657	0,151	-4,363	0,0005 ***	0,543	-1,475	0,797	-1,851	0,0854 *	0,197
Canadá	0,280	0,142	1,971	0,0663 *	0,195	0,189	0,084	2,251	0,0388 **	0,240	0,846	0,324	2,615	0,0204 **	0,328
Chile	0,626	0,343	1,827	0,0864 *	0,173	1,900	0,098	19,41	1,52e-012 ***	0,959	0,039	0,061	0,645	0,5293	0,029
Corea del Sur	0,744	0,038	19,41	1,52e-012 ***	0,959	0,532	0,093	5,696	3,31e-05 ***	0,670	0,364	0,075	4,853	0,0003 ***	0,627
Dinamarca	-0,387	0,137	-2,826	0,0122 **	0,333	1,528	0,188	8,116	4,60e-07 ***	0,805	0,742	0,513	1,445	0,1704	0,130
EE. UU.	-0,251	0,141	-1,783	0,0935 *	0,166	0,198	0,063	3,169	0,0060 ***	0,386	-0,698	0,427	-1,634	0,1246	0,160
España	0,533	0,097	5,498	4,87e-05 ***	0,654	1,267	0,121	10,47	1,45e-08 ***	0,873	0,684	1,969	0,347	0,7334	0,009
Finlandia	-0,039	0,062	-0,625	0,5407	0,024	1,315	0,202	6,503	7,28e-06 ***	0,726	0,300	0,861	0,349	0,7323	0,009
Francia	-0,704	0,103	-6,844	3,94e-06 ***	0,745	0,423	0,167	2,526	0,0225 **	0,285	-0,797	0,630	-1,266	0,2261	0,103
Grecia	0,950	0,100	9,502	5,57e-08 ***	0,849	0,980	0,098	9,978	2,83e-08 ***	0,862	2,482	0,460	5,397	9,42e-05 ***	0,675
Irlanda	-0,234	0,086	-2,711	0,0154 **	0,315	1,125	0,103	0,103	8,32e-09 ***	0,881	-0,718	0,327	-2,196	0,0455 **	0,256
Italia	0,128	0,113	1,127	0,2765	0,073	0,210	0,149	1,404	0,1793	0,110	4,052	0,766	5,289	5,289	0,666
Japón	0,320	0,157	2,038	0,0584 *	0,206	-0,599	0,178	-3,367	0,0039 ***	0,415	0,124	0,353	0,352	0,7301	0,009
Luxemburgo	-2,033	0,246	-8,266	3,62e-07 ***	0,810	0,839	0,210	3,999	0,0010 ***	0,500	1,746	2,422	0,721	0,4828	0,036
Noruega	1,541	0,082	18,68	2,73e-012 ***	0,956	1,504	0,139	10,80	9,32e-09 ***	0,879	-0,545	0,734	-0,743	0,4695	0,038
Países Bajos	-0,094	0,184	-0,509	0,6176	0,016	-0,352	0,225	-1,564	0,1374	0,133	-1,661	0,750	-2,215	0,0439 **	0,259
Portugal	1,349	0,145	9,286	7,62e-08 ***	0,843	1,954	0,082	0,082	6,50e-014 ***	0,972	-0,617	1,549	-0,399	0,6961	0,011
Reino Unido	-0,237	0,146	-1,618	0,1252	0,141	-0,365	0,081	-4,516	0,0004 ***	0,560	0,919	0,595	1,545	0,1447	0,146
Suecia	-0,809	0,241	-3,361	0,0040 ***	0,414	1,194	0,148	8,046	5,15e-07 ***	0,802	1,158	0,225	5,140	0,0002 ***	0,654

Tabla 22. Resultados para la elasticidad ecológica de la huella material con tres subperíodos.

	1970-1987					1988-2005					2006-2021				
	EE	σ	Est. t	Valor p	R ²	EE	σ	Est. t	Valor p	R ²	EE	σ	Est. t	Valor p	R ²
Alemania	0,206	0,075	2,754	0,0141 **	0,322	-0,431	0,158	-2,722	0,0151 **	0,317	-0,966	0,237	-4,081	0,0011 ***	0,543
Australia	-0,317	0,153	-2,073	0,0547 *	0,212	0,452	0,121	3,729	0,0018 ***	0,465	-2,718	0,508	-5,351	0,0001 ***	0,672
Austria	0,319	0,090	3,540	0,0027 ***	0,439	0,140	0,141	0,989	0,3373	0,058	-0,797	0,506	-1,575	0,1377	0,150
Bélgica	-0,149	0,197	-0,754	0,4621	0,034	0,237	0,145	1,641	0,1203	0,144	-1,308	0,792	-1,653	0,1206	0,163
Canadá	0,158	0,127	1,244	0,2315	0,088	0,283	0,283	1,343	0,198	0,101	-1,452	0,479	-3,030	0,0090 ***	0,396
Chile	0,769	0,379	2,029	0,0594 *	0,205	0,885	0,059	15,09	7,02e-011 ***	0,934	0,394	0,249	1,583	0,1358	0,152
Corea del Sur	0,575	0,032	18,12	4,37e-012 ***	0,954	0,645	0,084	7,643	9,98e-07 ***	0,785	0,150	0,133	1,128	0,2785	0,083
Dinamarca	0,024	0,159	0,149	0,8838	0,001	1,949	0,173	11,27	5,09e-09 ***	0,888	-0,273	0,575	-0,475	0,6419	0,016
EE. UU.	-0,189	0,121	-1,567	0,1367	0,133	0,786	0,047	16,83	1,34e-011 ***	0,947	0,031	0,431	0,072	0,9437	0,000
España	0,715	0,103	6,922	3,43e-06 ***	0,750	1,133	0,152	7,455	1,37e-06 ***	0,776	1,321	1,568	0,843	0,4136	0,048
Finlandia	0,461	0,056	8,296	3,45e-07 ***	0,811	0,848	0,185	4,580	0,0003 ***	0,567	1,038	1,038	1,751	0,1019	0,180
Francia	-0,172	0,123	-1,401	0,1803	0,109	0,632	0,120	5,283	7,43e-05 ***	0,636	-1,463	0,772	-1,895	0,0790 *	0,204
Grecia	0,866	0,058	14,83	9,05e-011 ***	0,932	1,252	0,076	16,55	1,73e-011 ***	0,945	2,686	0,181	14,83	5,91e-010 ***	0,940
Irlanda	0,216	0,077	2,824	0,0122 **	0,333	1,150	0,131	8,747	1,71e-07 ***	0,827	0,101	0,382	0,264	0,7959	0,005
Italia	0,362	0,115	3,132	0,0064 ***	0,380	0,770	0,166	4,627	0,0003 ***	0,572	3,305	3,305	5,647	6,02e-05 ***	0,695
Japón	0,587	0,120	4,892	0,0002 ***	0,599	-0,598	0,265	-2,254	0,0386 **	0,241	-0,489	0,361	-1,354	0,1972	0,116
Luxemburgo	-0,491	0,196	-2,501	0,0236 **	0,281	0,856	0,105	8,178	4,16e-07 ***	0,807	2,204	1,395	1,580	0,1364	0,151
Noruega	0,417	0,035	12,00	2,07e-09 ***	0,900	0,870	0,118	7,380	1,55e-06 ***	0,773	-0,419	1,079	-0,388	0,7036	0,011
Países Bajos	0,707	0,185	3,814	0,0015 ***	0,476	0,582	0,103	5,648	3,63e-05 ***	0,666	-0,375	0,621	-0,603	0,5559	0,025
Portugal	0,645	0,093	6,965	3,19e-06 ***	0,752	1,514	0,096	15,84	3,37e-011 ***	0,940	-0,177	1,546	-0,115	0,9104	0,001
Reino Unido	0,320	0,113	2,831	0,0121 **	0,334	0,597	0,078	7,657	9,75e-07 ***	0,786	0,103	0,676	0,152	0,8814	0,002