

Capítulo 1

El papel del crecimiento económico y la energía renovable en las emisiones de CO₂

*Carlos A. Carrasco*¹

*Mónica P. Balboa Villarreal*²

DOI: <https://doi.org/10.61728/AE26001739>



¹ Escuela de Negocios, Universidad de Monterrey (UEM), México.

ORCID: 0000-0002-5439-4960. Email: carlos.carrasco@udem.edu

² Escuela de Ingeniería y Tecnologías, Universidad de Monterrey (UEM), México.

ORCID: 0009-0004-3877-560X. Email: monica.balboa@udem.edu

Resumen

La crisis climática hace imprescindible analizar los distintos factores que inciden en la degradación ambiental. Este estudio explora la posible existencia de una relación no lineal entre las emisiones de gases de efecto invernadero —particularmente el CO_2 —, el crecimiento económico y el consumo de energías renovables mediante modelos de umbral discreto. Dentro de los gases de efecto invernadero, se ha puesto especial atención al CO_2 por su contribución al calentamiento global y la estrecha relación con el consumo de combustibles fósiles utilizados para la producción. La estrategia empírica consta de dos enfoques complementarios. El primero considera una muestra de 115 países con distintos niveles de desarrollo; el segundo se enfoca en un análisis de dos grupos específicos: países de altos ingresos y países de ingresos medio-altos. El análisis muestra que, en los niveles de ingreso más bajos, el aumento del PIB per cápita y del consumo de energías renovables se asocian con una disminución en las emisiones de CO_2 . No obstante, en los niveles de ingreso más altos, el PIB per cápita se asocia con mayores emisiones, aunque el uso de energías renovables continúa manteniendo una relación negativa, lo que ayuda a mitigar el impacto ambiental.

1. Introducción

Durante las últimas décadas, la temperatura global ha aumentado de forma gradual en comparación con los niveles preindustriales. Este incremento está relacionado con la creciente concentración de gases de efecto invernadero (GEI), en particular el dióxido de carbono (CO_2), que se emite principalmente por la quema de combustibles fósiles utilizados en los procesos de producción y consumo (Azhar Khan et al., 2014).

La relación entre el desempeño económico y las emisiones de GEI es compleja y multifacética. Diversos estudios han encontrado una co-

relación positiva, lo que sugiere que el crecimiento económico suele ir acompañado de un aumento en las emisiones (Antonakakis et al., 2017; Knight y Schor, 2014; Walheer, 2018).

En este contexto, resulta especialmente relevante analizar la interacción entre el consumo de energía renovable, el crecimiento económico y las emisiones de GEI, dado el fuerte vínculo entre las emisiones y el uso de combustibles fósiles, así como el creciente potencial de las energías renovables gracias a los avances tecnológicos en producción, almacenamiento y distribución.

Comprender la relación entre el consumo de energía renovable, los niveles de ingreso y las emisiones de GEI es fundamental para diseñar políticas económicas y climáticas eficaces, así como para avanzar en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. Las barreras para el uso de las energías renovables solo pueden superarse mediante una evaluación transparente de sus ventajas y limitaciones, y una comunicación efectiva tanto con los responsables de políticas públicas como con la ciudadanía. Esto, a su vez, puede contribuir a priorizar la inversión pública y privada en el sector.

En este trabajo se analiza la relación entre el consumo de energía renovable, el PIB per cápita y las emisiones de CO₂, utilizando una muestra completa de 115 países y dos submuestras que incluyen países de ingresos medio-altos y altos. Se aplican modelos de regresión por umbrales para identificar los niveles de ingreso a partir de los cuales se modifica la relación entre emisiones de CO₂, consumo de energía renovable y PIB per cápita. Para la muestra completa se incluyen pruebas de robustez utilizando el agregado de los GEI con su equivalencia en emisiones de CO₂ como ha sido establecido por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Si bien se espera una relación negativa entre el uso de energía renovable y las emisiones, nuestro enfoque metodológico permite detectar cambios en la dirección, magnitud y significancia estadística de esta relación en un conjunto heterogéneo de países.

El resto del trabajo se organiza de la siguiente manera. La sección 2 muestra un panorama general de la relación entre degradación ambiental, el desempeño económico y la transición energética. En la sección 3 se presentan los datos y se describe la estrategia empírica basada en mode-

los por umbral discreto. La sección 4 discute los resultados del modelo base e incluye pruebas de robustez con una especificación ampliada. La sección 5 expone las implicaciones de política y los comentarios finales.

2. La degradación ambiental, el desempeño económico y la transición energética

El ser humano y los procesos económicos están vinculados con los ciclos ecológicos mediante los recursos naturales utilizados para la producción y el consumo de bienes (Buchholz y Rübhelke, 2019). En consecuencia, las actividades productivas y extractivas ejercen presión sobre los ecosistemas, provocando modificaciones en el medio ambiente que resultan en su afectación.

La degradación ambiental es el deterioro de los recursos naturales y de los ecosistemas, originado por procesos naturales y exacerbado por las actividades antropogénicas (Maurya et al., 2020). Dicha degradación se manifiesta en alteraciones de la biosfera, es decir, en los medios terrestres, acuáticos y atmosféricos que afectan la biodiversidad. De manera concreta, el aumento de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)³ por las actividades humanas contribuye directamente al incremento de la temperatura media global. Este fenómeno se le conoce como calentamiento global y es considerado uno de los principales impulsores del cambio climático a largo plazo.

Desde 1861, las temperaturas globales se han incrementado, aunque con diferencias entre regiones a nivel mundial (Ritchie et al., 2023; Samborska, 2024). Como respuesta, se han tomado medidas de mitigación y adaptación que incluyen tratados, protocolos y acuerdos internacionales. En el escenario actual, el Acuerdo de París es el principal tratado internacional vigente cuyo objetivo es limitar el calentamiento global por debajo de los 2 °C respecto a los niveles preindustriales (Ritchie,

³ Los gases de efecto invernadero son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC), el hexafluoruro de azufre (SF₆) y el trifluoruro de nitrógeno (NF₃). Estos gases se diferencian por su origen, su tiempo de residencia en la atmósfera y el Potencial de Calentamiento Global (PCG). El gas de referencia es el CO₂, y el de mayores emisiones a nivel global.

2023; United Nations Climate Change, s. f.). En el Acuerdo de París se reconoce la responsabilidad diferenciada, al considerar que los países en desarrollo tardarán más en alcanzar las metas planteadas y su contribución a las emisiones de GEI difiere respecto a los países de mayor nivel de ingreso. A largo plazo, se plantea la neutralidad de carbono mediante el equilibrio entre emisiones y absorciones. De manera complementaria, se adaptaron los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como una agenda global hacia el año 2030, conformada por 17 objetivos de enfoque multidimensional que incluyen la acción climática y el consumo de energía asequible y no contaminante.

En este contexto, la reducción de GEI se puede afrontar de diversas maneras. Entre las principales se encuentran la adaptación de energías renovables, la eficiencia energética, la transición energética de combustibles fósiles hacia aquellos bajos o no productores de carbono, así como la conservación, protección y restauración de ecosistemas naturales (Aswathanarayana et al., 2010; United Nations Environment Programme, 2024).

La energía renovable y la transición energética se han puesto en el centro del debate como parte fundamental en la estrategia de contención del cambio climático. La energía renovable es aquella que proviene de fuentes naturales que se reponen de manera continua y en plazos relativamente cortos (Coburn y Farhar, 2004). Estas fuentes incluyen la energía solar, eólica, geotérmica, hidroeléctrica, marina y bioenergía. Bajo esta definición, la transición energética es la sustitución progresiva y sistemática de los combustibles fósiles por fuentes de baja o nula emisión, las cuales son principalmente renovables. Este cambio es integral, ya que no es solo un cambio tecnológico y ambiental, sino un proceso impulsado por el mercado, arreglos políticos y dinámicas socioculturales (Blazquez et al., 2020).

A pesar del creciente interés, el desarrollo y despliegue de las energías renovables enfrentan importantes desafíos (Olabi et al., 2023), como el financiamiento limitado para proyectos a gran escala o las barreras técnicas relacionadas con el almacenamiento e integración a la red eléctrica debido a la intermitencia, el efecto asimétrico del precio del petróleo sobre el consumo de energía renovable (Rong y Qamruzzaman, 2022), la aceptación social y obstáculos normativos y administrativos.

A nivel empírico, la relación entre desarrollo económico y degradación ambiental se ha evaluado a través de la Curva de Kuznets Ambiental (CKA). La CKA sostiene que la degradación ambiental aumenta en las primeras etapas de desarrollo económico y luego disminuye tras un punto de inflexión. La CKA ha sido extensamente evaluada en la literatura económica, especialmente a través del análisis de la relación entre emisiones de CO₂ y el PIB per cápita (Arango Miranda et al., 2020; Gómez y Rodríguez, 2022; Wang et al., 2023) y el North American Free Trade Agreement (NAFTA). Estudios más recientes han enriquecido este análisis al incorporar variables explicativas adicionales como el consumo de energía (Aruga, 2019), la calidad institucional (Bekun et al., 2021), la industrialización (Idowu et al., 2023), la intensidad energética (Shahbaz et al., 2013), la producción agrícola (Waheed et al., 2018) y la complejidad económica (Chu, 2021).

No obstante, la hipótesis de la CKA ha enfrentado diversas críticas, particularmente por sus debilidades metodológicas y la sensibilidad a cambios en la especificación (Kaika y Zervas, 2013); la presencia de resultados contradictorios y su limitada capacidad de generalización (Husnain et al., 2021); la omisión de factores globales relevantes en los análisis nacionales, especialmente para el CO₂ de efecto global (Boutaud et al., 2006); la temporalidad de mejoras ambientales debido a la aparición de nuevos contaminantes provenientes de las nuevas tecnologías (Guo y Shahbaz, 2024); la existencia de trayectorias en forma de N por obsolescencia tecnológica (Balsalobre-Lorente et al., 2023); y la interpretación equivocada de sus implicaciones en términos de política pública (Ciegis et al., 2008), asumiendo que el crecimiento económico por sí mismo se traducirá en menores emisiones.

En el análisis de la relación entre la degradación ambiental y el crecimiento económico, la composición de las fuentes de energía utilizadas para el consumo juega un papel clave (Jahanger et al., 2022; Sun et al., 2022). Además, existe evidencia de una relación positiva entre la expansión de las energías renovables y el desarrollo económico, destacando que la inversión en infraestructura limpia puede actuar como motor de desarrollo en diferentes sectores (Adeleye et al., 2025; Aydoğan y Vardar, 2020).

En el caso de las economías emergentes y en desarrollo, la transición energética está limitada por el acceso a financiamiento, la dependencia tecnológica y las deficiencias institucionales. Estas limitaciones muestran una diferencia clave respecto a los países desarrollados, en los que la energía renovable y la transición energética han generado efectos positivos en la productividad. Por lo anterior, es clave incorporar el efecto del consumo de energías renovables en el estudio de la interacción entre degradación ambiental y desarrollo económico, así como reconocer las diferencias entre grupos de países como consecuencia del nivel de desarrollo y otras características económicas, sociales e institucionales.

3. Datos y metodología

3.1 Datos

El análisis empírico abarca en su aproximación inicial una muestra de 115 países para el periodo 1998-2022 (ver Tabla 1A en el Apéndice). Las variables empleadas para el análisis empírico fueron obtenidas de los Indicadores Mundiales de Desarrollo del Banco Mundial: emisiones de CO₂ per cápita, emisiones totales de gases de efecto invernadero, población total, densidad poblacional, población urbana, PIB per cápita, crecimiento del PIB, valor agregado de la industria, valor agregado de la agricultura, silvicultura y pesca, consumo de energía renovable, exportaciones de tecnología media y alta, y apertura comercial.

La variable de emisiones de gases de efecto invernadero per cápita está expresada en equivalentes de toneladas métricas de CO₂ utilizando la estandarización basada en el Potencial de Calentamiento Global establecido por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. La variable de emisiones de gases de efecto invernadero incluye a los seis gases regulados por el Protocolo de Kioto: dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos y hexafluoruro de azufre. La Tabla 1 presenta un resumen de los estadísticos descriptivos básicos y las definiciones de las variables utilizadas.

Tabla 1.
Estadísticas descriptivas.

	Descripción de las variables	Media	Me-diana	Max.	Min.	Dev. Est.	Obs.
CO ₂ per cápita	Emisiones de CO ₂ en toneladas métricas per cápita	5.1	3.6	39.3	0.1	5.7	115
Emisiones de gases de efecto invernadero per cápita	Emisiones totales de gases de efecto invernadero en toneladas métricas de CO ₂ equivalente per cápita	7.6	5.6	54.4	0.8	7.6	115
Energía renovable	Consumo de energía renovable cómo % del consumo final total de energía	27.7	20.8	93.4	0.0	25.8	115
Densidad poblacional	Habitantes por km ² de superficie	172.0	74.5	6991.8	1.8	657.8	115
Población urbana	Población urbana cómo % de la población total	61.7	63.3	100.0	13.2	20.9	115
Crecimiento del PIB	Tasa de crecimiento anual	3.5	3.3	8.4	-0.5	1.8	115
PIB per cápita	Expresado en dólares estadounidenses constantes de 2015	14147.3	5273.9	80473.8	449.8	17939.0	115
Industria, valor añadido	Incluye construcción. Valor añadido cómo % del PIB	29.8	26.5	62.6	15.0	10.8	115
Agricultura, silvicultura y pesca, valor añadido	Valor añadido cómo % del PIB	9.5	7.3	40.0	0.0	8.6	115
Exportaciones de media y alta tecnología	Expresado cómo % de las exportaciones de manufacturas	34.2	32.9	81.4	0.2	21.6	115
Apertura comercial	Suma de exportaciones e importaciones cómo % del PIB	81.5	73.9	358.8	26.4	42.2	115

Fuente: Elaboración propia con datos de los Indicadores Mundiales de Desarrollo

3.2 Metodología

En el análisis empírico empleamos modelos de regresión por umbral discreta (Granger y Teräsvirta, 1993; Teräsvirta, 2010), un método econométrico no lineal que identifica la presencia de umbrales a partir de

los cuales la relación entre los regresores umbrales y la variable dependiente cambia. La regresión por umbral discreta considera la existencia potencial de m umbrales, lo que lleva a $m + 1$ régimen. La regresión puede expresarse de la siguiente manera:

$$y_i = X_i' \beta + Z_i' \delta_j + u_i \quad (1)$$

Así, X incluye las variables cuyos coeficientes no cambian entre regímenes, mientras que los parámetros δ_j de las variables Z son específicos al régimen j . La regresión por umbral discreta se puede expresar con una función indicadora:

$$y_i = X_i' \beta + \sum_{j=0}^m 1_j(q_i, \gamma) \cdot Z_i' \delta_j + u_i \quad (2)$$

En donde q_i es la variable umbral y γ son los valores umbrales. La función indicadora $1_j(q_i, \gamma)$ será 1 si la variable umbral q_i se encuentra dentro de los valores umbrales que refinan al régimen de tal forma que $1_j(q_i, \gamma) = 1(\gamma_i \leq q_i < \gamma_{i+1})$. Los valores umbrales γ se identifican utilizando la prueba Bai-Perron de umbrales secuencialmente determinados $L + 1$ versus L (Bai y Perron, 1998).

Las variables umbral (Z) para cada régimen j son el PIB per cápita y el consumo de energías renovables, siendo el PIB per cápita la variable que determina el umbral (q_i) utilizando el programa Eviews 14.

Para el análisis empírico, en una primera aproximación se emplea el promedio de los valores de los años disponibles para cada uno de los 115 países, implementando modelos de regresión por umbral discreto con datos de sección cruzada. En la segunda aproximación, se examinan y se contrastan dos grupos de países diferenciados por nivel de ingreso: países de ingresos medio-altos (37 países) y países de ingresos altos (40 países), siguiendo la clasificación del Banco Mundial para 2024 (World Bank, 2024). La Tabla 1A en el Anexo presenta la lista de países en cada grupo. Para esta segunda aproximación se sigue la estrategia de Chinn y Prasad (2003), calculando promedios no solapados de 5 años con el objetivo de analizar las transiciones de medio plazo. Este enfoque utiliza modelos de umbral discreto con datos agrupados.

El modelo base incluye como regresores sin umbral a la densidad poblacional, la población urbana, el crecimiento del PIB, el valor añadido de la industria y la apertura comercial. Las pruebas de robustez expanden el modelo al incorporar a las exportaciones de media y alta tecnología como una variable que controla la composición de las exportaciones, el desarrollo tecnológico y el valor agregado de la agricultura, silvicultura y pesca.

4. Resultados

Los resultados del análisis empírico inicial se presentan en la Tabla 2, la cual incluye datos transversales para una muestra de 115 países en diferentes etapas de desarrollo. La variable dependiente en este análisis son las emisiones de CO₂ per cápita. Los modelos 1 al 3 utilizan el PIB per cápita como variable umbral, identificando el primer umbral en 4250.9 dólares estadounidenses. Por debajo de este nivel de ingreso, tanto el PIB per cápita como el consumo de energía renovable se asocian negativamente con las emisiones de CO₂. Sin embargo, una vez superado este umbral, la relación entre el PIB per cápita y las emisiones de CO₂ se vuelve positiva, mientras que la relación negativa con el consumo de energía renovable se mantiene significativa.

En cuanto a las variables de control, la densidad poblacional, las exportaciones de tecnología media y alta, así como el valor agregado del sector primario, presentan una relación negativa y estadísticamente significativa con las emisiones de CO₂ per cápita. En contraste, la población urbana y el valor agregado industrial muestran una asociación positiva con dichas emisiones. Es importante señalar que la inclusión del valor agregado del sector primario tiende a alterar los resultados del modelo, posiblemente debido a factores estructurales propios del contexto o a problemas de multicolinealidad.

Los modelos 4 al 6 se enfocan en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) per cápita, expresadas en equivalentes de CO₂, y también utilizan el PIB per cápita como variable de umbral. En este caso, el consumo de energía renovable sigue mostrando una relación negativa con las emisiones de GEI, y su efecto se vuelve más fuerte a medida que aumentan los niveles de ingreso. La relación entre PIB per cápita y emi-

siones de GEI es no lineal: es negativa en niveles bajos de ingreso y se vuelve positiva en niveles altos. Las variables de control que permanecen estadísticamente significativas en estos modelos incluyen la densidad poblacional, que continúa mostrando una relación negativa, así como la población urbana y el valor agregado industrial, ambos positivamente asociados con las emisiones de GEI. Las exportaciones de tecnología media y alta, junto con el valor agregado del sector primario, presentan una relación negativa con las emisiones. No obstante, esta última variable vuelve a distorsionar los resultados, lo que sugiere cierta inestabilidad en las estimaciones cuando se incluye.

Tabla 2.
Regresiones por umbral con la muestra completa.

Variable umbral	CO ₂ per cápita como variable dependiente			GEI per cápita como variable dependiente		
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6
	PIB per cápita			PIB per cápita		
Umbral 1	PIB per cápita <4250.9	PIB per cápita <4250.9	PIB per cápita <4250.9	PIB per cápita <38527.2	PIB per cápita < 4250.9	PIB per cápita < 4250.9
PIB per cápita	-0.001***	-0.001***	-0.001***	0.0003***	-0.001***	-0.002***
Consumo de energía renovable	-0.031**	-0.035**	-0.039**	-0.022	-0.031*	-0.043***
Umbral 2	4250.9 <=PIB per cápita	4250.9 <=PIB per cápita	4250.9 <=PIB per cápita <8203.859	38527.2 <=PIB per cápita	4250.9 <=PIB per cápita	4250.9 <=PIB per cápita <8203.8
PIB per cápita	0.0002***	0.0002***	-0.0003	0.0003***	0.0002***	-0.0001**
Consumo de energía renovable	-0.144***	-0.149***	-0.074***	-0.340***	-0.155***	-0.037
Umbral 3			8203.9 <=PIB per cápita			8203.8 <=PIB per cápita
PIB per cápita			0.0002			0.0002***
Consumo de energía renovable			-0.237			-0.279***

	CO ₂ per cápita como variable dependiente			GEI per cápita como variable dependiente		
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6
	PIB per cápita			PIB per cápita		
	Variables sin umbral					
Constante	-3.548	-2.546	4.312*	-7.628**	-4.578	4.703
Densidad poblacional	-0.001***	-0.001***	-0.001***	-0.002**	-0.001***	-0.002***
Población urbana	0.062***	0.065***	0.056*	0.076***	0.118***	0.113***
Crecimiento del PIB	0.399	0.368	0.677**	0.525	0.607	1.032**
Industria, valor añadido	0.159***	0.148***		0.231***	0.213***	
Apertura comercial	-0.004			-0.011		
Exportaciones de media y alta tecnología		-0.029**	-0.047**		-0.084***	-0.107***
Agricultura, silvicultura y pesca, valor añadido			-0.157***			-0.187**
R-cuadrada	0.75	0.76	0.73	0.71	0.74	0.71
Est. F (valor p)	34.94(0.00)	36.26(0.00)	25.84(0.00)	28.80(0.00)	33.34(0.00)	22.95(0.00)
Obs.	115	115	115	115	115	115

Fuente: (*), [**] y {***} indican significancia estadística al (10 %), [5 %] y {1 %}. Estimaciones con errores White. Umbrales determinados por la prueba secuencial de Bai-Perron L+1 VS L.

La Tabla 3 presenta un análisis complementario enfocado en dos grupos de países con diferentes niveles de ingreso y desarrollo. El grupo de economías de ingreso alto incluye 40 países, mientras que el grupo de ingreso medio-alto está compuesto por 37 países. Para aumentar el número de observaciones y permitir estimaciones más robustas, el análisis utiliza promedios quinquenales no superpuestos para el periodo 1998-2022. Este enfoque agrupado no solo amplía el conjunto de datos, sino que también contribuye a suavizar las fluctuaciones de corto plazo y permite identificar patrones de mediano plazo. En ambos grupos, la variable dependiente son las emisiones de CO₂ per cápita.

Los modelos 7 al 9 presentan los resultados para los países de ingreso alto, utilizando el PIB per cápita como variable de umbral. En estos modelos se identifican tres umbrales, aproximadamente en 14 600, 37 262.8 y 46 217.3 USD. Por debajo del tercer umbral, el PIB per cápita no tiene un efecto significativo sobre las emisiones de CO₂. Sin embargo, a partir de ese nivel, su relación con las emisiones se vuelve positiva y estadísticamente significativa. En todos los regímenes, el consumo de energía renovable mantiene una relación negativa y significativa con las emisiones de CO₂, con un efecto más fuerte por debajo del primer umbral y por encima del tercero. Este patrón indica una asociación no lineal entre el uso de energía renovable y los resultados ambientales. Como en los modelos anteriores, la inclusión del valor agregado del sector primario distorsiona las estimaciones. Otras variables de control como la densidad poblacional, la población urbana, el valor agregado industrial y las exportaciones de tecnología media y alta son estadísticamente significativas y se comportan de acuerdo con lo esperado. Además, la apertura comercial surge como una variable significativa, mostrando una relación negativa con las emisiones.

Los modelos 10 al 12 presentan los resultados para los países de ingreso medio-alto. A diferencia del grupo de ingreso alto, el PIB per cápita en este grupo muestra un efecto positivo y estadísticamente significativo sobre las emisiones de CO₂ en todos los regímenes de ingreso. El consumo de energía renovable mantiene su relación negativa con las emisiones, y su efecto mitigador se intensifica conforme aumenta el PIB per cápita. Las variables de control significativas en este conjunto de modelos incluyen la densidad poblacional, que mantiene una asociación negativa, mientras que la población urbana y el valor agregado del sector primario también presentan una relación negativa con las emisiones. Estos resultados difieren de los encontrados en la muestra completa y en el grupo de ingreso alto, lo que sugiere que la relación entre variables estructurales y resultados ambientales varía significativamente según el nivel de desarrollo económico.

Tabla 3.
Regresiones por umbral por nivel de ingreso.

Variable umbral	Países de ingresos altos			Países de ingresos medios-altos		
	Modelo 7	Modelo 8	Modelo 9	Modelo 10	Modelo 11	Modelo 12
	PIB per cápita			PIB per cápita		
Umbral 1	PIB per cápita <14566.3	PIB per cápita <14630.2	Sin umbral	PIB per cápita <6502.1	PIB per cápita <9400.2	PIB per cápita <6502.1
PIB per cápita	0.000001	-0.00002	0.0001***	0.0004***	0.001***	0.0002
Consumo de energía renovable	-0.213***	-0.227***	-0.212***	-0.094***	-0.069***	-0.077***
Umbral 2	14566.3 ≤PIB per cápita <37262.8	14630.2 ≤PIB per cápita <37262.8		6502.1 ≤PIB per cápita <8671.4	9400.2 ≤PIB per cápita	6502.1 ≤PIB per cápita <8839.9
PIB per cápita	-0.0001	-0.00002		0.0004***	0.0006***	0.0003*
Consumo de energía renovable	-0.064*	-0.102***		-0.047***	-0.189***	-0.043***
Umbral 3	37262.8 ≤PIB per cápita <46217.3	37262.8 ≤PIB per cápita <46217.3		8671.4 ≤PIB per cápita		8839.936 ≤PIB per cápita
PIB per cápita	0.00005	0.00003		0.0005***		0.0004***
Consumo de energía renovable	-0.081***	-0.059**		-0.166***		-0.226***
Umbral 4	46217.3 ≤PIB per cápita	46217.3 ≤PIB per cápita				
PIB per cápita	0.0001***	0.0001***				
Consumo de energía renovable	-0.237***	-0.236***				
Variables sin umbral						
Constante	-2.909	-2.695	8.085***	8.772***	5.308***	9.909***
Densidad poblacional	-0.0002	-0.001***	-0.001***	-0.011***	-0.008***	-0.009***
Población urbana	0.089***	0.097***	0.112***	-0.074***	-0.054***	-0.066***
Crecimiento del PIB	-0.029	-0.098	0.570**	0.008	0.005	0.014

	Países de ingresos altos			Países de ingresos medios-altos		
	Modelo 7	Modelo 8	Modelo 9	Modelo 10	Modelo 11	Modelo 12
	PIB per cápita			PIB per cápita		
	Variables sin umbral					
Industria, valor añadido	0.306***	0.268***		0.012	0.017	
Apertura comercial	-0.022***			0.000		
Exportaciones de media y alta tecnología		-0.029**	-0.108***		0.0001	0.001
Agricultura, silvicultura y pesca, valor añadido			-0.988***			-0.119***
R-cuadrada	0.79	0.78	0.62	0.62	0.58	0.61
F-stat (valor p)	52.04(0.00)	49.08(0.00)	44.58(0.00)	24.78(0.00)	24.49(0.00)	22.93(0.00)
Obs.	195	196	200	182	172	172

Fuente: (*), [**] y {***} indican significancia estadística al (10 %), [5 %] y {1 %}. Estimaciones con errores White. Umbrales determinados por la prueba secuencial de Bai-Perron L+1 VS L.

5. Comentarios finales

La crisis climática acentúa la necesidad de examinar los factores que impulsan la degradación ambiental y de explorar estrategias eficaces de mitigación. Una de las formas más relevantes de degradación ambiental es el cambio climático, reflejado en el aumento sostenido de la temperatura media global con respecto a los niveles preindustriales. El cambio climático está estrechamente vinculado a la emisión de gases de efecto invernadero, en particular el CO₂, generado principalmente por la quema de combustibles fósiles para la producción y el consumo.

Ante esta situación, se han intensificado los esfuerzos para desarrollar fuentes de energía alternativas basadas en materiales renovables. La energía renovable no solo tiene el potencial de reducir significativamente las emisiones de GEI, sino que también se caracteriza por el aprovechamiento de fuentes que se reponen de manera natural en el corto plazo.

Este estudio contribuye en el análisis de la relación entre las emisiones de CO₂, el PIB per cápita y el consumo de energía renovable mediante

modelos de regresión por umbrales. El análisis revela una relación no lineal entre el PIB per cápita y las variables ambientales, con efectos umbral que difieren según el grupo de ingresos. Al emplear la muestra completa, en niveles bajos de ingreso (umbral de 4250.9 USD), los aumentos en el PIB per cápita y en el consumo de energía renovable se asocian con menores emisiones de CO₂ y GEI. Sin embargo, en niveles de ingreso por encima del umbral, el PIB per cápita se correlaciona positivamente con las emisiones, mientras que la energía renovable sigue desempeñando un papel mitigador. Variables de control como la densidad poblacional y las exportaciones de tecnología media y alta se asocian generalmente con menores emisiones, mientras que la urbanización y el valor agregado industrial se relacionan con mayores emisiones. El valor agregado del sector primario presenta un comportamiento inestable y suele distorsionar los resultados.

Al emplear submuestras de países de ingresos altos y de ingresos medios-altos, los resultados cambian. En países de ingresos altos, demuestran incrementos en el PIB per cápita cuando los países se encuentran por debajo del tercer umbral (46 217 USD); no muestran resultados consistentes en términos de significancia estadística. No obstante, incrementos en el ingreso por encima del tercer umbral muestran una relación positiva entre crecimiento y emisiones de CO₂. En todos los regímenes, los resultados son consistentes al mostrar evidencia de una asociación negativa entre el consumo de energía renovable y las emisiones de CO₂.

En países de ingresos medios-altos, los incrementos en el ingreso muestran de forma consistente una asociación positiva con las emisiones de CO₂, independientemente del umbral. Por su parte, el consumo de energía renovable se asocia negativamente con las emisiones, con efectos mayores en niveles altos de ingreso. Las diferencias entre los grupos de países muestran que las características estructurales y económicas influyen en la relación entre emisiones y crecimiento: en los países de ingreso medio-alto, el PIB aumenta consistentemente las emisiones, mientras que en los de ingreso alto este efecto solo se observa en umbrales de ingreso muy elevados.

Estos hallazgos tienen diversas implicaciones de política pública. En primer lugar, es fundamental mantener un compromiso firme y sostenido

con el desarrollo y uso de energía renovable, enfrentando los desafíos económicos, técnicos, sociales y regulatorios que implica esta transición. Un mayor consumo de energía renovable puede reducir significativamente las emisiones de CO₂, contribuir a estabilizar la temperatura global y mitigar la degradación ambiental, especialmente en niveles de ingresos por encima de los umbrales de 4250 USD para la muestra completa y 8671 USD en los países de ingresos medios-altos y por debajo de 14 566 en los países de ingresos altos. Para lograrlo, se requiere una mayor inversión en infraestructura energética, especialmente en capacidad de almacenamiento que permita enfrentar la intermitencia de estas fuentes.

En segundo lugar, comprender cómo se relaciona el crecimiento económico con las emisiones de GEI según los niveles de ingreso es clave para diseñar políticas de mitigación sensibles al contexto. En particular, los países de ingreso alto, cuyas emisiones per cápita son considerablemente mayores, deben asumir el liderazgo en la reducción de emisiones. Estos países cuentan con los niveles de ingreso y los recursos necesarios para apoyar una transición energética robusta, un camino que sigue siendo más complejo para las naciones de menores ingresos.

En tercer lugar, más allá de promover la energía renovable y de desacoplar el crecimiento económico de las emisiones, es crucial identificar otros factores que contribuyan a la reducción de emisiones. Entre ellos se encuentra la mayor densidad poblacional, que puede mejorar la eficiencia de los sistemas de transporte público y el uso de medios alternativos de transporte, y la expansión de exportaciones con mayor valor agregado que favorecen el desarrollo e integración de tecnologías más limpias en los procesos productivos.

Finalmente, debe cuestionarse la idea de un crecimiento económico ilimitado en un mundo con recursos finitos. El modelo de producción actual ha dado lugar a la creencia generalizada de un crecimiento perpetuo. Reconocer los límites al crecimiento es esencial para garantizar la sostenibilidad social y ambiental a largo plazo.

Para concluir, es importante reconocer los límites que presentó este trabajo y establecer futuras vías de investigación. Este trabajo es una primera aproximación a la identificación de relaciones no lineales entre las emisiones de CO₂, el PIB per cápita y el consumo de energía renovable.

No obstante, la estrategia metodológica es limitada en el establecimiento de relaciones causales y en el control de endogeneidad. Por ello, en futuros trabajos se sugiere el empleo de técnicas alternativas de estimación que permitan robustecer la evidencia, como variables instrumentales o el Método Generalizado de Momentos.

Referencias

- Adeleye, B. N., Soyly, Ö. B., Ergül, M., y Balsalobre-Lorente, D. (2025). *Reintroducing evidence of the role of energy usage dynamics on environmental management in E7 countries*. *Journal of Environmental Management*, 386. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125667>
- Antonakakis, N., Chatziantoniou, I., y Filis, G. (2017). Energy consumption, CO₂ emissions, and economic growth: An ethical dilemma. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 808–824. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.105>
- Arango Miranda, R., Hausler, R., Romero Lopez, R., Glaus, M., y Pa-sillas-Diaz, J. R. (2020). *Testing the Environmental Kuznets Curve Hypothesis in North America's Free Trade Agreement (NAFTA) Countries*. *Energies*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/en13123104>
- Aruga, K. (2019). *Investigating the Energy-Environmental Kuznets Curve Hypothesis for the Asia-Pacific Region*. *Sustainability*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/su11082395>
- Aswathanarayana, U., Harikrishnan, T., y Kadher-Mohien, T. S. (Eds.). (2010). *Green Energy*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10163>
- Aydoğan, B., y Vardar, G. (2020). *Evaluating the role of renewable energy, economic growth and agriculture on CO₂ emission in E7 countries*. *International Journal of Sustainable Energy*, 39(4), 335–348. <https://doi.org/10.1080/14786451.2019.1686380>
- Azhar Khan, M., Zahir Khan, M., Zaman, K., y Naz, L. (2014). *Global estimates of energy consumption and greenhouse gas emissions*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 336–344. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.091>
- Bai, J., y Perron, P. (1998). *Estimating and Testing Linear Models with Multiple Structural Changes*. *Econometrica*, 66(1), 47. <https://doi.org/10.2307/2998540>

- Balsalobre-Lorente, D., Shahbaz, M., Murshed, M., y Nuta, F. M. (2023). *Environmental impact of globalization: The case of central and Eastern European emerging economies*. *Journal of Environmental Management*, 341. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118018>
- Bekun, F. V., Gyamfi, B. A., Onifade, S. T., y Agboola, M. O. (2021). *Beyond the environmental Kuznets Curve in E7 economies: Accounting for the combined impacts of institutional quality and renewables*. *Journal of Cleaner Production*, 314. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127924>
- Blazquez, J., Fuentes, R., y Manzano, B. (2020). *On some economic principles of the energy transition*. *Energy Policy*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111807>
- Boutaud, A., Gondran, N., y Brodhag, C. (2006). (Local) *Environmental quality versus (global) ecological carrying capacity: What might alternative aggregated indicators bring to the debates about environmental Kuznets curves and sustainable development?* *International Journal of Sustainable Development*, 9(3). <https://doi.org/10.1504/ijsd.2006.012850>
- Buchholz, W., y Rübhelke, D. (2019). *Foundations of Environmental Economics*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-16268-9>
- Chinn, M. D., y Prasad, E. S. (2003). *Medium-term determinants of current accounts in industrial and developing countries: An empirical exploration*. *Journal of International Economics*, 59(1), 47–76. [https://doi.org/10.1016/S0022-1996\(02\)00089-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1996(02)00089-2)
- Chu, L. K. (2021). *Economic structure and environmental Kuznets curve hypothesis: New evidence from economic complexity*. *Applied Economics Letters*, 28(7), 612–616. <https://doi.org/10.1080/13504851.2020.1767280>
- Ciegis, R., Streimikiene, D., y Zavadskas, E. K. (2008). *The use of the environmental Kuznets curve: Environmental and economic implications*. *International Journal of Environment and Pollution*, 33(2/3), 313. <https://doi.org/10.1504/ijep.2008.019401>
- Coburn, T. C., y Farhar, B. C. (2004). *Public Reaction to Renewable Energy Sources and Systems*. In *Encyclopedia of Energy*. 207-222. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00462-9>

- Gómez, M., y Rodríguez, J. C. (2022). *Analysis of the environmental Kuznets curve in the NAFTA Countries, 1971-2014*. *EconoQuantum*, 57–79. <https://doi.org/10.18381/eq.v17i2.7151>
- Granger, C. W. J., y Teräsvirta, T. (1993). *Modelling nonlinear economic relationships*. Oxford University Press.
- Guo, X., y Shahbaz, M. (2024). *The existence of environmental Kuznets curve: Critical look and future implications for environmental management*. *Journal of Environmental Management*, 351. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119648>
- Husnain, M. I. U., Haider, A., y Khan, M. A. (2021). *Does the environmental Kuznets curve reliably explain a developmental issue?* *Environmental Science and Pollution Research*, 28(9), 11469-11485. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11402-x>
- Idowu, A., Ohikhuare, O. M., y Chowdhury, M. A. (2023). *Does industrialization trigger carbon emissions through energy consumption? Evidence from OPEC countries and high industrialised countries*. *Quantitative Finance and Economics*, 7(1), 165-186. <https://doi.org/10.3934/QFE.2023009>
- Jahanger, A., Yu, Y., Hossain, M. R., Murshed, M., Balsalobre-Lorente, D., y Khan, U. (2022). *Going away or going green in NAFTA nations? Linking natural resources, energy utilization, and environmental sustainability through the lens of the EKC hypothesis*. *Resources Policy*, 79, 103091. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103091>
- Kaika, D., y Zervas, E. (2013). *The environmental Kuznets curve (EKC) theory. Part B: Critical issues*. *Energy Policy*, 62, 1403–1411. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.130>
- Knight, K., y Schor, J. (2014). *Economic Growth and Climate Change: A Cross-National Analysis of Territorial and Consumption-Based Carbon Emissions in High-Income Countries*. *Sustainability*, 6(6), 3722-3731. <https://doi.org/10.3390/su6063722>
- Maurya, P. K., Ali, S. A., Ahmad, A., Zhou, Q., Da Silva Castro, J., Khane, E., y Ali, A. (2020). *An introduction to environmental degradation: Causes, consequence and mitigation*. In *Environmental Degradation: Causes and Remediation Strategies*, 1-20. Agro Environ Media - Agriculture and Environmental Science Academy, Haridwar, India. <https://doi.org/10.26832/aesa-2020-edcrs-01>

- Olabi, A. G., Elsaid, K., Obaideen, K., Abdelkareem, M. A., Rezk, H., Wilberforce, T., Maghrabie, H. M., y Sayed, E. T. (2023). *Renewable energy systems: Comparisons, challenges and barriers, sustainability indicators, and the contribution to UN sustainable development goals*. *International Journal of Thermofluids*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100498>
- Ritchie, H. (2023). *How much CO2 can the world emit while keeping warming below 1.5°C and 2°C?* *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/how-much-co2-can-the-world-emit-while-keeping-warming-below-15c-and-2c>
- Ritchie, H., Rosado, P., y Roser, M. (2023). *CO2 and Greenhouse Gas Emissions*. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>
- Rong, G., y Qamruzzaman, M. (2022). *Symmetric and asymmetric nexus between economic policy uncertainty, oil price, and renewable energy consumption in the United States, China, India, Japan, and South Korea: Does technological innovation influence?* *Frontiers in Energy Research*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.973557>
- Samborska, V. (2024). *How much have temperatures risen in countries across the world?* *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/temperature-anomaly>
- Shahbaz, M., Ozturk, I., Afza, T., y Ali, A. (2013). *Revisiting the environmental Kuznets curve in a global economy*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 494–502. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.021>
- Sun, Y., Li, H., Andlib, Z., y Genie, M. G. (2022). *How do renewable energy and urbanization cause carbon emissions? Evidence from advanced panel estimation techniques*. *Renewable Energy*, 185, 996–1005. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.112>
- Teräsvirta, T. (2010). *Threshold Models*. In S. N. Durlauf y L. E. Blume (Eds.), *Macroeconometrics and Time Series Analysis*. 308–316. Palgrave Macmillan UK. https://doi.org/10.1057/9780230280830_34
- United Nations Climate Change. (s. f.). *El Acuerdo de París* | CMNUCC. <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>

- United Nations Environment Programme. (2024). *Emissions Gap Report 2024: No more hot air ... please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments*. United Nations Environment Programme. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/46404>
- Waheed, R., Chang, D., Sarwar, S., y Chen, W. (2018). *Forest, agriculture, renewable energy, and CO2 emission*. *Journal of Cleaner Production*, 172, 4231–4238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.287>
- Walheer, B. (2018). *Economic growth and greenhouse gases in Europe: A non-radial multi-sector nonparametric production-frontier analysis*. *Energy Economics*, 74, 51–62. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.05.028>
- Wang, Q., Zhang, F., y Li, R. (2023). *Revisiting the environmental kuznets curve hypothesis in 208 counties: The roles of trade openness, human capital, renewable energy and natural resource rent*. *Environmental Research*, 216. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114637>
- World Bank. (2024). *World Bank Country and Lending Groups*. *World Bank Open Data*. <https://datahelpdesk.worldbank.org/knowledgebase/articles/906519-world-bank-country-and-lending-groups>

Anexo

Tabla 1A.

Lista de países

Muestra completa	Países de ingresos medio-altos	Países de ingresos altos
Afganistán, Albania, Argelia, Angola, Argentina, Armenia, Australia, Austria, Azerbaiyán, Bangladesh, Bielorrusia, Bélgica, Bolivia, Bosnia y Herzegovina, Botsuana, Brasil, Bulgaria, Camboya, Camerún, Canadá, Chile, China, Colombia, Costa Rica, Costa de Marfil, Croacia, Cuba, Chequia, Dinamarca, Ecuador, Egipto, El Salvador, Etiopía, Finlandia, Francia, Gabón, Georgia, Alemania, Ghana, Grecia, Guatemala, Honduras, Hungría, India, Indonesia, Irán, Irak, Irlanda, Israel, Italia, Jamaica, Japón, Jordania, Kazajistán, Kenia, Kuwait, Kirguistán, Laos, Líbano, Libia, Lituania, Madagascar, Malasia, México, Moldavia, Mongolia, Marruecos, Namibia, Países Bajos, Nueva Zelanda, Nicaragua, Níger, Macedonia del Norte, Noruega, Omán, Pakistán, Panamá, Papúa Nueva Guinea, Paraguay, Perú, Filipinas, Polonia, Portugal, Qatar, República del Congo, Rumania, Rusia, Arabia Saudita, Senegal, Serbia, Singapur, Eslovaquia, Eslovenia, Sudáfrica, Corea del Sur, España, Sri Lanka, Suecia, Suiza, Siria, Tanzania, Tailandia, Túnez, Turquía, Uganda, Ucrania, Emiratos Árabes Unidos, Reino Unido, Estados Unidos, Uruguay, Uzbekistán, Vietnam, Yemen, Zambia, Zimbabue	Albania, Argentina, Armenia, Azerbaiyán, Bielorrusia, Bosnia y Herzegovina, Botsuana, Brasil, Bulgaria, China, Colombia, Costa Rica, Cuba, República Dominicana, El Salvador, Ecuador, Gabón, Georgia, Guatemala, Indonesia, Irak, Jamaica, Kazajistán, Libia, Malasia, México, Moldavia, Namibia, Macedonia del Norte, Paraguay, Perú, Federación de Rusia, Serbia, Sudáfrica, Tailandia, Turquía, Turkmenistán	Alemania, Arabia Saudita, Australia, Austria, Bélgica, Canadá, Chile, Croacia, Dinamarca, Emiratos Árabes Unidos, Eslovenia, España, Estados Unidos, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Israel, Italia, Japón, Kuwait, Lituania, Noruega, Nueva Zelanda, Omán, Países Bajos, Panamá, Polonia, Portugal, Qatar, Reino Unido, República Checa, República Eslovaca, Rumania, Singapur, Suecia, Suiza, Uruguay

Nota: Clasificación del Banco Mundial para 2024

