

UNEMI

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

REPÚBLICA DEL ECUADOR
UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
FACULTAD DE POSGRADOS

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

MAGÍSTER EN ECONOMÍA

TEMA:

CONSUMO DE ENERGÍA RENOVABLE Y EMISIONES DE CO₂ EN
PAÍSES DE ALTO INGRESO, 2005-2020

AUTOR: JUAN PABLO VALLEJO

DIRECTOR: LUIS EDUARDO SOLÍS GRANDA

MILAGRO, 2024

Derechos de autor

Sr. Dr.

Fabricio Guevara Viejó

Rector de la Universidad Estatal de Milagro

Presente.

Yo, Juan Pablo Vallejo Mata en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de este informe de investigación, mediante el presente documento, libre y voluntariamente cedo los derechos de Autor de este proyecto de titulación, que fue realizado como requisito previo para la obtención del título de MAGÍSTER EN ECONOMÍA, como aporte a la Línea de Investigación Análisis Micro y Macroeconómico de conformidad con el Art. 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, concedo a favor de la Universidad Estatal de Milagro una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Conservo a mi favor todos los derechos de autor sobre la obra, establecidos en la normativa citada.

Así mismo, autorizo a la Universidad Estatal de Milagro para que realice la digitalización y publicación de este Proyecto de Investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

El autor declara que la obra objeto de la presente autorización es original en su forma de expresión y no infringe el derecho de autor de terceros, asumiendo la responsabilidad por cualquier reclamación que pudiera presentarse por esta causa y liberando a la Universidad de toda responsabilidad.

Milagro, 4 de julio de 2024

Juan Pablo Vallejo Mata

0603735994

Aprobación del Director del Trabajo de Titulación

Yo, Luis Eduardo Solís Granda en mi calidad de director del proyecto de titulación, APRUEBO el trabajo elaborado por Juan Pablo Vallejo Mata, cuyo tema es Consumo de Energía Renovable y Emisiones de CO2 en países de alto ingreso, 2005-2020, que aporta a la Línea de Investigación Análisis Micro y Macroeconómico, previo a la obtención del Grado MAGÍSTER EN ECONOMÍA. Este trabajo se articula sobre la base de una investigación aplicada y/o de desarrollo, inspirada en la teoría económica. Su enfoque metodológico contiene al menos una técnica econométrica robusta para validar los objetivos de la investigación, considero que el proyecto reúne los requisitos y méritos necesarios para ser sometido a la evaluación por parte del tribunal calificador que se designe. En dicho sentido, solicito que el trabajo sea habilitado para continuar con el proceso de titulación de la alternativa de Proyecto de Titulación con componente de investigación aplicada, en la Maestría en Economía de la Universidad Estatal de Milagro.

Milagro, 4 de julio de 2024

Luis Eduardo Solís Granda

0917032245

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
FACULTAD DE POSGRADO
CERTIFICACIÓN DE LA DEFENSA

El TRIBUNAL CALIFICADOR previo a la obtención del título de **MAGÍSTER EN ECONOMÍA**, presentado por **ECON. VALLEJO MATA JUAN PABLO**, otorga al presente proyecto de investigación denominado "CONSUMO DE ENERGÍA RENOVABLE Y EMISIONES DE CO2 EN PAÍSES DE ALTO INGRESO, 2005-2020", las siguientes calificaciones:

| | |
|-----------------------|------------------|
| TRABAJO DE TITULACION | 60.00 |
| DEFENSA ORAL | 40.00 |
| PROMEDIO | 100.00 |
| EQUIVALENTE | Excelente |



Firmado electrónicamente por:
**JAVIER PATRICIO
CADENA SILVA**

**CADENA SILVA JAVIER PATRICIO
PRESIDENTE/A DEL TRIBUNAL**



Firmado electrónicamente por:
**SEGUNDO MARVIN
CAMINO MOGRO**

**CAMINO MOGRO SEGUNDO MARVIN
VOCAL**



Firmado electrónicamente por:
**DIANA VERONICA
TERAN MOLINA**

**Msc. TERAN MOLINA DIANA VERONICA
SECRETARIO/A DEL TRIBUNAL**

Juan Pablo Vallejo¹, Luis Eduardo Solis Granda²

Palabras clave:

emisiones de CO2;
consumo de energías
renovables; PIB;
apertura comercial;
rezagos distribuidos
autorregresivos

Resumen

Utilizando una muestra de treinta países de alto ingreso, la presente investigación pretende analizar el impacto de la energía renovable sobre las emisiones de CO2. Utilizando un modelo de rezagos distribuidos autorregresivos transversal, se determinó que las energías renovables son un mecanismo fundamental para mitigar las emisiones de dióxido de carbono en el corto y largo plazo. Otros hallazgos importantes fueron la corroboración de una relación en forma de U invertida entre el PIB y las emisiones de CO2, y el impacto positivo de la apertura comercial sobre las emisiones de CO2. Finalmente, la densidad urbana resultó ser no significativa en los patrones de emisiones de CO2 en la muestra analizada. Todos los resultados fueron corroborados por medio de la aplicación de un segundo modelo, específicamente por el método de Grupo de Media Aumentada.

Códigos JEL: P28; Q43; Q56

Keywords:

CO2 emissions;
renewable energy
consumption; GDP;
commercial opening;
autoregressive
distributed lags

Abstract

Using a sample of thirty high-income countries, this research aims to analyze the impact of renewable energy on CO2 emissions. Using a cross-sectional autoregressive distributed lag model, it was determined that renewable energies are a fundamental mechanism to mitigate carbon dioxide emissions in the short and long term. Other important findings were the corroboration of an inverted U-shaped relationship between GDP and CO2 emissions, and the positive impact of trade openness on CO2 emissions. Finally, urban density turned out to be non-significant in the CO2 emissions patterns in the analyzed sample. All results were corroborated through the application of a second model, specifically by the Augmented Mean Group method.

¹ Universidad Estatal de Milagro, Cda. Universitaria “Dr. Rómulo Minchala Murillo”
– km. 1.5 vía Milagro, Maestría en Economía, jvallejom6@unemi.edu.ec institucional
de contacto.

² Universidad Estatal de Milagro, Cda. Universitaria “Dr. Rómulo Minchala Murillo”
– km. 1.5 vía Milagro, lsolisg@unemi.edu.ec.

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| Derechos de autor | ii |
| Aprobación del Director del Trabajo de Titulación | iii |
| CERTIFICACIÓN DE LA DEFENSA | iv |
| Resumen/Abstract..... | v |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA TEÓRICA Y EMPÍRICA | 3 |
| 2.1. Energía renovable y emisiones de CO2 | 3 |
| 2.2. Crecimiento económico y emisiones de CO2 | 6 |
| 2.3. Densidad de la población urbana y emisiones de CO2 | 8 |
| 2.4. Apertura comercial y emisiones de CO2 | 9 |
| 2.5. Limitaciones en la literatura | 11 |
| 3. METODOLOGÍA | 11 |
| 3.1. Descripción de las variables y datos | 11 |
| 3.2. Construcción del modelo..... | 13 |
| 3.3. Estrategia econométrica..... | 13 |
| 4. Hallazgos empíricos y discusión de resultados | 15 |
| 4.1. Estimaciones previas al modelo CS-ARDL | 15 |
| 4.2. Estimación de relaciones de corto y largo plazo: Modelo de Rezagos Distribuidos Autorregresivos Transversales (CS-ARDL) | 17 |
| 4.3. Control de robustez..... | 19 |
| 4.4. Discusión de resultados | 19 |
| 5. CONCLUSIONES E IMPLICACIONES DE POLÍTICA ECONÓMICA | 20 |
| 6. REFERENCIAS | 22 |
| 7. ANEXOS | 35 |

1. INTRODUCCIÓN

En la dinámica de la economía moderna, la diversificación de actividades económicas se ha posicionado como una estrategia para acelerar el crecimiento económico (Shabani 2024). En este sentido, el consumo de energía se ha convertido en un determinante clave de este proceso, principalmente por la intensificación en el uso de combustibles fósiles para la expansión de actividades productivas relacionadas con la industrialización (Rahman et al. 2023). Existe un cuerpo importante de la literatura que respalda la hipótesis de crecimiento a través del consumo energético (Stern 1993; Bowden y Payne 2009; Tugcu et al. 2012). Este patrón ha conducido a un incremento significativo de la demanda de energía, especialmente la energía fósil, la cual representa alrededor del 80% del consumo energético mundial (Kim y Park, 2022; Acheampong et al. 2022; Zhou et al. 2023).

Esta situación ha desencadenado una serie de externalidades negativas, en las que destaca un aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), responsables de la degradación ambiental y el calentamiento global (Bergougui, 2024). Para 2022, las emisiones de GEI alcanzaron un nivel de 53.8 GtCO₂ eq, lo que significa un aumento de 2.3% en comparación con 2021, donde el 71.6% de estas fueron emisiones de dióxido de carbono (CO₂) (Crippa et al. 2023). En 2023, las emisiones de CO₂ a nivel mundial relacionadas con la energía crecieron en 1.1%, logrando un nivel históricamente alto de 37.400 millones de toneladas (Gt) (IEA 2024).

Los niveles sin precedentes de emisiones de CO₂ en 2023 provocaron que la temperatura media global rebasara los 14.9^o C, superando los niveles de 2016, donde se registraron máximos récords en la

temperatura global (Shabani, 2024). Por lo tanto, estas tendencias crecientes de las emisiones de CO₂ han derivado en condiciones climáticas extremas y en mayores probabilidades de que ocurran desastres naturales (Liao et al. 2024), que afecten la salud y bienestar de la población y ocasionen pérdidas significativas en la biodiversidad (Pradhan et al. 2024; Huo et al. 2022). Este escenario se vuelve aún más crítico bajo recientes pronósticos, donde estiman que las emisiones de GEI aumenten en un 52% en 2050 (Lin y Okoye 2023), lo que provocaría que la temperatura global para 2100 incremente entre 3 y 5^o C (Dasgupta et al. 2023). De esta manera, lograr los objetivos establecidos en el Acuerdo de París en 2015, específicamente un incremento de la temperatura por debajo de los 2^oC sobre los niveles preindustriales con cero emisiones de CO₂ para 2050, se encuentra lejos de ser alcanzada (Inal et al. 2022).

En respuesta a los desafíos que el mundo enfrenta en relación al calentamiento global, resulta urgente implementar mecanismos para reducir las emisiones de GEI. En este sentido, los países desarrollados y en desarrollo tradicionalmente han implementado impuestos sobre el carbono y distintas actividades contaminantes para reducir las emisiones de estos gases nocivos (Wolde-Rufael y Mulat-Weldemeskel 2021, 2023). Sin embargo, a pesar de que existe evidencia de que los impuestos ambientales ayudan a mitigar las emisiones de CO₂ (Ulucak et al. 2020; Wolde-Rufael y Mulat-Weldemeskel 2022), estos están condicionados a tasas impositivas óptimas, lo cual genera incertidumbre sobre sus resultados (Aydin y Esen 2018; Rakpho et al. 2023). Además, su implementación se ha mantenido en debate, particularmente por sus implicaciones en la pérdida de eficiencia de ciertos grupos de interés que son dependientes de actividades intensivas de combustibles fósiles,

generando impactos negativos a nivel socioeconómico (Wang et al. 2016; Semet 2024). Por tal motivo, se ha establecido un consenso en la comunidad mundial de redirigir los esfuerzos para incentivar la transición hacia energías renovables, la cual actué como mecanismo para mitigar los efectos perjudiciales de las emisiones de GEI (Shabani 2024).

La transición hacia energías renovables para enfrentar la crisis climática no es un tema reciente, y se ha mantenido en debate durante las últimas décadas. Entre las primeras investigaciones en abordar este tema se encuentran los estudios desarrollados por Lysen (1989), Lee y Ryu (1991) y Wisniewski et al. (1995), en donde resaltan el potencial de las energías renovables para reducir las emisiones de CO₂. El fundamento inicial de esta relación parte de la teoría de la Curva Ambiental de Kuznet (EKC), cuya hipótesis predice una relación en forma de U invertida ente crecimiento económico y degradación ambiental (Stern 2004). Según la hipótesis EKC, en las etapas tempranas de desarrollo, se genera un aumento de consumo de energía fósil, lo cual afecta negativamente la calidad ambiental. No obstante, en etapas superiores de desarrollo, donde se promueve el uso de energías limpias y la adopción de tecnologías, la calidad ambiental mejora (Wolde-Rufael y Mulat-Weldemeskel 2022). Hasta la actualidad, diversas investigaciones siguen respaldando el rol de las energías renovables para mitigar el daño ambiental causado por las emisiones de CO₂ provenientes de las actividades económicas (Apergis et al., 2018; Khan et al., 2020; Jebli et al., 2020; Bergougui, 2024; Shabani, 2024).

Sin embargo, a pesar del interés de la literatura en investigar el impacto de las energías renovables en la calidad ambiental, la mayoría de estudios han centrado su atención en países en desarrollo, donde enfrentan grandes obstáculos para la implementación de fuentes modernas de energía renovable,

principalmente en términos de accesibilidad y asequibilidad (Briera y Lefèvre 2024; Shabani 2024). En contraste, son escasos los estudios que han abordado esta problemática en países en alto ingreso. Aunque estos países han logrado grandes avances en materia de energías renovables, también enfrentan desafíos significativos, especialmente en cuanto a si las capacidades de estas energías pueden satisfacer las necesidades energéticas en un contexto de intensificación de actividades económicas (Olabi et al. 2023). A estos desafíos se suman preocupaciones técnicas y políticas sobre las consecuencias ambientales y socioeconómicas. Por ejemplo, el estrés ambiental generado por la infraestructura requerida para el desarrollo de energías renovables o la pérdida de empleo en los sectores energéticos convencionales (Olabi et al. 2023). Por tanto, este estudio busca aportara a la literatura y proporcionar evidencia sólida para informar a los formuladores de políticas públicas el potencial de promocionar las energías limpias.

De esta manera, el objetivo de la presente investigación es analizar el impacto de las energías renovables en la reducción de las emisiones de CO₂ en países de alto ingreso, teniendo presente que estos a pesar de albergan al 15% de la población mundial, producen el 34.4% de emisiones de CO₂ en el mundo (Hannah Ritchie 2023). Además, países como Alemania, Estados Unidos, Italia, y Reino Unido han aumentado su producción de emisiones de CO₂ (Huang et al. 2022). En este sentido, la investigación contribuye a la literatura en tres formas. En primer lugar, analiza la magnitud del impacto de las energías renovables para mitigar las emisiones de CO₂ en el corto y largo plazo. En segundo lugar, se investiga la relación entre crecimiento económico y emisiones de CO₂ bajo la hipótesis EKC. En tercer lugar, se examinan otros determinantes de las emisiones de CO₂, principalmente la densidad poblacional urbana y apertura

comercial. Para cumplir con los objetivos, se utilizan datos del Banco Mundial de 30 países de alto ingreso durante el periodo 2000-2020. Para proporcionar resultados robustos, se establece un sub-panel de los principales 15 países emisores de CO₂, permitiendo profundizar en el análisis de magnitudes. Metodológicamente se utiliza un modelo de rezagos distribuidos autorregresivo transversal (CS-ARDL) para datos de panel, el cual permite estimar relaciones de corto y largo plazo considerando la heterogeneidad y la dependencia transversal dentro de la muestra seleccionada. Así mismo, para corroborar estos resultados se implementa la técnica de Grupo de Media Aumentada (AMG).

La investigación se estructura de la siguiente manera. La sección 2 aborda la revisión de la literatura, tanto teórica como empírica. La sección 3 describe la metodología. La sección 4 presenta los hallazgos empíricos y en la sección 5 se desarrollan las conclusiones.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA TEÓRICA Y EMPÍRICA

2.1. Energía renovable y emisiones de CO₂

Ante el creciente deterioro del medio ambiente provocado por el uso intensivo de las energías fósiles, las energías renovables, como la eólica, solar, e hidroeléctrica, han surgido como alternativas eficientes para mitigar las emisiones de CO₂ (Amer et al. 2024). Distintas razones explican el impacto negativo de las energías renovables en las emisiones de CO₂. En primer lugar, las energías renovables, gracias a su generación natural, no liberan dióxido de carbono a la atmósfera y, por lo tanto, no contaminan el medio ambiente (Wang et al. 2024). En segundo lugar, al sustituir a las energías no renovables, como el petróleo y el gas, en las actividades productivas, las energías renovables fomentan la eficiencia energética. Esto

significa que se reduce el consumo de combustibles fósiles manteniendo los niveles de producción, lo cual promueve la sostenibilidad ecológica (Wang et al. 2023a). Además, la integración de energías renovables en los sistemas energéticos fomenta el desarrollo de tecnologías verdes, lo que conduce a mayores niveles de eficiencia energética y, en última instancia, a una significativa reducción de las emisiones de CO₂ (Song et al. 2024).

Según las implicaciones teóricas, varios estudios empíricos han examinado el impacto de las energías renovables en las emisiones de CO₂ bajo distintas condiciones temporales y espaciales. Con base a un panel de umbral dinámico para 67 países entre el periodo de 1999 a 2019, Shabani, (2024) encuentra que las energías renovables tienen un impacto negativo sobre las emisiones de CO₂. Además, evidencia que el capital humano amplifica el efecto de las energías renovables, principalmente en países desarrollados. En esta línea, Amer et al. (2024) por medio del método de mínimos cuadrados generalizados factibles (FGLS) encontraron que las energías no renovables se asocian positivamente con las emisiones de CO₂ en los países que conforman el Consejo de Cooperación del Golfo (CCG) entre 1995 y 2017. Contrariamente, las energías renovables mitigan significativamente las emisiones de CO₂. Para 27 países de la OCDE entre 2001 a 2020, Işık et al. (2024) evidencian una correlación negativa entre las energías renovables y emisiones de CO₂. Li y Haneklaus (2022) aplicando un modelo de panel de rezagos distribuidos autorregresivos (ARDL) para las economías del G7 en el periodo de 1979 a 2019, respaldan el efecto de las energías renovables para reducir las emisiones de CO₂. Más específicamente, encuentran que por un aumento del 1% en el consumo de energías limpias, las emisiones de CO₂ se reducen en un 0.33% en el corto plazo y en un 0,099% en el largo plazo. De manera similar, Yang y Umar (2022) encuentran que las

energías renovables reducen las emisiones de CO₂ en las economías G7. Además, evidencian que la globalización es otro determinante para mitigar dichas emisiones, principalmente porque promueven la transferencia de tecnologías en el contexto de energías limpias.

Aunque los estudios anteriores, que se han centrado principalmente en economías desarrolladas, revelan el importante papel que desempeñan las energías renovables en la sostenibilidad ambiental, es importante examinar la contribución de estas energías en economías en desarrollo. En este sentido, Yadav et al. (2024) examinan el impacto de la buena gobernanza, la inversión en energías renovables y las finanzas verdes en los países de la BRICS (Brasil, Rusia, India, China y Sudáfrica) entre 2000 y 2013. Utilizando el modelo de retardo distribuido autorregresivo transversal (CS-ARDL), los resultados muestran que las inversiones en energías renovables reducen las emisiones de CO₂ en el largo plazo, y el efecto se amplifica al incorporar el desarrollo de las finanzas verdes. Además, varios estudios centrados en países de la BRICS respaldan el papel de las energías renovables en la sostenibilidad ambiental (Adebayo y Samour, 2024; Khan et al., 2022; Fu et al., 2021). Sin embargo, Pata (2021) encuentra que el efecto de las energías renovables en los países de la BRICS es heterogéneo. Según los hallazgos, este tipo de energías permiten reducir la contaminación ambiental en Brasil y China. Mientras que, en Rusia e India, estas energías no influyen sobre la presión ambiental.

Al mismo tiempo, diversos estudios han abordado este tema en otras regiones de mundo. Por ejemplo, investigaciones como las de Rahman y Alam (2022a), Amin et al. (2024), Zhang et al. (2023a) coinciden en encontrar que las energías renovables reducen las emisiones de CO₂ en distintas regiones de Asia, tanto en el corto como en el largo plazo. Sin

embargo, persiste un efecto heterogéneo. Alam y Hossain (2024), mediante el enfoque de retardos distribuidos autorregresivos (ARDL), evidencian que el aumento del uso de energías renovables reduce en el corto y largo plazo las emisiones de CO₂ en China. Complementando el modelo ARDL con el enfoque de causalidad de Granger del modelo de Vectores de Corrección de Errores (VEC), Chen et al. (2019) respaldan el efecto mitigador de las energías renovables en China sobre las emisiones de CO₂. En contraste, Zaidi et al. (2018), utilizando el modelo ARDL, encuentran que el consumo de energías renovables tiene un impacto no significativo sobre las emisiones de CO₂ en un escenario donde el carbón y el gas natural son los principales responsables de la degradación ambiental en Pakistán. Este hallazgo muestra los obstáculos que Pakistán enfrenta en relación a la adopción de energías renovables, siendo las condiciones económicas el factor principal, seguido de la falta de acceso a créditos, la inestabilidad política y el alto riesgo a inversiones (Shahzad et al. 2023).

En el contexto de África, Acheampong et al. (2019) utilizando técnicas de panel con efectos fijos y aleatorios, encuentran que las energías renovables contribuyen a mitigar las emisiones de CO₂ en 46 países del África Subsahariana. En esta línea, investigaciones como las de Elom et al. (2024), Aquilas (2024), Kwakwa (2023a, b) y Namahoro et al. (2022) respaldan la capacidad de las energías renovables para reducir las emisiones de CO₂ en distintas regiones de África. Por otro lado, para la región de América Latina y el Caribe, Koengkan y Fuinhas (2020) aplicando un modelo de panel bajo el enfoque de rezagos distribuidos autorregresivos (PARDL), encuentran que las energías renovables tienen un impacto negativo en las emisiones de CO₂ en el corto de -0.0675 y en el largo plazo de -0.0313. De la misma manera, los hallazgos de Yuping et al. (2021), Raihan (2023), Raihan y Tuspekova (2022) y

Nahrin et al. (2023), respaldan la capacidad de las energías renovables para promover la sostenibilidad ambiental, principalmente en países dependientes de energías no renovables. Además, Silva et al. (2021) menciona que los niveles de degradación ambiental en América Latina y el Caribe tienen un efecto positivo sobre la capacidad instalada de energías renovables no hidroeléctricas, lo cual revela los puntos críticos de contaminación que la región enfrenta.

Por otro lado, la literatura también ha centrado su atención en investigar los efectos de las distintas fuentes de energía renovable sobre las emisiones de CO₂. Para las diez principales economías de la Unión Europea entre el periodo 1991 a 2019, Mohsin et al. (2023) utilizando técnicas de panel de cuartil sobre cuartil encuentran que el consumo de energía hidroeléctrica reduce sustancialmente las emisiones de CO₂. Además, Bello et al. (2018), al aplicar técnicas de causalidad de Granger, bajo el enfoque del modelo de Vectores de Corrección de Errores (VECM) para datos de la economía de Malasia entre el periodo de 1971 a 2016, evidencia una reducción significativa de la degradación ambiental debido al uso de energía hidroeléctrica. Sin embargo, los efectos de este tipo de energía renovable

pueden ser asimétricos. Por ejemplo, Bilgili et al. (2021), utilizando el modelo de transformación de wavelet aplicado en Estados Unidos para el periodo 1980 a 2019, señalan que la energía hidroeléctrica aumenta las emisiones de CO₂ en el corto plazo, pero las reduce en el largo plazo. Además, Güney (2022), al analizar datos de 35 países de distintos niveles de ingreso entre 2005 y 2018, encuentran que el aumento de la utilización de energía solar conduce a una disminución de las emisiones de CO₂. De manera similar, Yu et al. (2022), utilizando datos de los diez principales países consumidores de energía solar entre el periodo 1991 a 2018 y aplicando el modelo de cuartil sobre cuartil, reportan que a excepción de Francia, la energía solar reduce las emisiones de CO₂. En cuanto a la energía eólica, Güney y Üstündağ (2022), tomando una muestra de 37 países para el periodo 2000 a 2019 mediante el método de Grupo de Media Aumentada (AMG), encontraron que el aumento del 1% en el consumo de energía eólica reduce en un 0,018% las emisiones de CO₂.

En la tabla 1, se resumen investigaciones adicionales sobre el vínculo entre energías renovables y emisiones de CO₂.

Tabla 1. Estudios empíricos adicionales: Energías renovables y emisiones de CO₂

| Autor | País(es), Datos, Metodología | Variable endógena | Variable(s) independiente(s) | Conclusión |
|----------------------------------|--|---|--|--|
| Alam et al. (2023) | India; 1990Q1-2018Q4; técnica econométrica de ruptura estructural. | Emisiones de CO ₂ ; huella de carbono; intensidad de carbono | Energía renovable Globalización Producción agrícola Densidad poblacional | Energía renovable → contaminación atmosférica |
| Balsalobre-Lorente et al. (2023) | BRICS; 1995-2020; Mínimos cuadrados totalmente modificados (FMOLS) y mínimos cuadrados dinámicos (DOLS). | Emisiones de dióxido de carbono per cápita | Índice de complejidad económica Energías renovables Inversión extranjera directa | Energía renovable → Emisiones CO ₂ |

| | | | | |
|-------------------------------|--|---------------------------------|---|--|
| Hao et al. (2023) | Vietnam; 2000-2022; datos de panel por efectos fijos. | Emisiones de CO2 | Innovaciones o exportaciones de alta tecnología Consumo de energía renovable Entradas de IED Crecimiento económico | Energía renovable - → Emisiones CO2 |
| Phadkantha y Tansuchat (2023) | Tailandia; 1990-2019; modelo de retardos distribuidos autorregresivo (ARDL). | Emisión de carbono per cápita | Eficiencia energética PIB per cápita Energía renovable | Energía renovable - → Emisiones CO2 |
| Rahman et al. (2022b) | 22 países desarrollados; 1990-2018; panel de retardo distribuido autorregresivo no lineal (NARDL). | Emisiones de carbono per cápita | PIB per cápita Energía renovable Investigación y Gasto en desarrollo Índice de calidad de las exportaciones | Energía renovable - → Emisiones CO2 |

Nota. $\overset{U}{\rightarrow}$ efecto en forma de U; $\overset{-}{\rightarrow}$ efecto negativo.

En relación a la literatura revisada, la primera hipótesis de la investigación es la siguiente:

Hipótesis 1

H1: Las energías renovables tienen un impacto negativo en las emisiones de CO2.

2.2. Crecimiento económico y emisiones de CO2

El vínculo entre crecimiento económico y calidad ambiental ha sido objeto de debate desde la década de 1960, siendo abordada inicialmente por la teoría de la extracción de los recursos naturales (Brock y Taylor, 2005). Desde entonces, la literatura ha experimentado un crecimiento significativo y se han registrado efectos negativos, positivos y mixtos del crecimiento económico sobre las emisiones de CO2. En cuanto al efecto negativo, se menciona que un mayor crecimiento económico está asociado fuertemente con el progreso tecnológico y la innovación, lo cual permite adoptar mejores prácticas medioambientales que reducen las emisiones de CO2 (Hashmi y

Alam 2019). De esta manera, una rápida adopción de tecnologías dentro de las actividades económicas promoverá una mayor calidad ambiental (Caglar et al. 2024). Por otro lado, el efecto positivo se explica mediante la relación entre el crecimiento económico y la utilización de recursos naturales. En otras palabras, a medida que las actividades económicas crecen, la demanda de materias primas aumenta, lo que a su vez incrementa las emisiones de CO2 (Agboola et al. 2021). De esta manera, el dilema que enfrentan los formuladores de políticas públicas es descuidar los procesos de conservación en aras de alcanzar mayores niveles de crecimiento económico.

Finalmente, el efecto mixto es abordado mediante la hipótesis de la Curva Ambiental de Kuznet (EKC). La hipótesis EKC, formulada por Grossman y Krueger (1991), postula una relación en forma de U invertida entre el ingreso per cápita y la contaminación. Según esta hipótesis, la contaminación ambiental aumenta hasta cierto punto a medida que aumenta el ingreso; sin embargo, una vez alcanzado cierto punto de inflexión, la contaminación comienza a disminuir (Dinda, 2004). La idea central de la hipótesis EKC es la siguiente: en las primeras etapas de

crecimiento económico se utiliza intensivamente los recursos naturales, lo que genera mayores niveles de contaminación ambiental. Además, en esta etapa, dado que el nivel de ingreso per cápita es bajo, tanto la población como las instituciones tienden a ignorar las externalidades negativas del crecimiento. Sin embargo, a medida que la economía se desarrolla y los ingresos aumentan, se valora más el medio ambiente. La estructura productiva, al incorporar tecnología, se redirige hacia modelos ambientalmente más sostenibles, lo que reduce la presión ambiental (Leal y Marques 2022).

En lo referente a los estudios empíricos, su principal objetivo ha sido verificar la hipótesis EKC bajo diversas condiciones y diferentes metodologías econométricas. En este sentido, los hallazgos de las investigaciones se pueden clasificar en tres categorías. En primer lugar, un grupo de investigaciones no encuentran evidencia sólida que respalda la relación de U invertida entre el nivel de ingresos y las emisiones de CO₂ (por ejemplo, Islama et al. 2023; Kanlı y Küçükefe 2023; Wencong et al. 2023). Estos hallazgos

sugieren que el crecimiento económico puede generar daño ambiental a largo plazo. En segundo lugar, otro grupo de investigaciones muestra resultados consistentes que respaldan la hipótesis EKC (por ejemplo, Ridzuan et al. 2020; Wang et al. 2024; Zhang et al. 2022; Zhang et al. 2020). Estos resultados evidencian que un mayor desarrollo económica promueve la transición hacia la sostenibilidad. Finalmente, un tercer grupo de estudios encuentran una relación en forma de N entre el crecimiento económico y las emisiones de CO₂; es decir, en una primera etapa el crecimiento económico está acompañado de un deterioro ambiental. En una segunda etapa, un mayor crecimiento reduce las emisiones de CO₂ hasta alcanzar un umbral que, al rebasarlo, la calidad ambiental empieza a empeorar nuevamente (por ejemplo, Ojaghlou et al. 2023; Fang y Gao 2023; Fakher et al. 2023).

En la tabla 2, se resumen investigaciones adicionales sobre el vínculo entre crecimiento económico y emisiones de CO₂.

Tabla 2. Estudios empíricos adicionales: Crecimiento económico y emisiones de CO₂

| Autor | País(es), Datos, Metodología | Variable endógena | Variable(s) independiente(s) | Conclusión |
|------------------------|---|---|--|--|
| Wang et al. (2023b) | 56 países; 2003-2018; regresión de umbral de panel. | Emisiones de dióxido de carbono per cápita | PIB per cápita Desigualdad de ingresos Urbanización Consumo de energía renovable Apertura comercial Estructura industrial | Crecimiento económico \xrightarrow{N} Emisiones CO ₂ |
| Mohammer et al. (2024) | EU-27; 1990-2019; Mínimos cuadrados ordinarios (DOLS) y de mínimos cuadrados ordinarios totalmente modificados (FMOLS). | Emisiones de CO ₂ - Total nacional | Consumo de energía PIB -precios de mercado Población | Crecimiento económico $\xrightarrow{\Omega}$ Emisiones CO ₂ |

| | | | | |
|---------------------|--|-------------------------------|---|--|
| Ahmad et al. (2023) | Países G-11; 1990-2018; rezagos distribuidos autorregresivos transversales (CS-ARDL). | Emissiones de CO ₂ | PIB Energías renovables Recursos naturales | Crecimiento económico → Emissiones CO ₂ |
| Bekun et al. (2021) | Bloque E7; 1995-2016; grupo de media aumentada, el estimador del grupo de media de efectos correlacionados comunes, el análisis de causalidad de Driscoll-Kraay y Dumitrescu y Hurlin. | Emissiones de CO ₂ | Crecimiento económico Energía renovable Calidad institucional | Crecimiento económico → Emissiones CO ₂ |

Nota. \xrightarrow{N} relación forma de N; \xrightarrow{n} relación U invertida

En relación a la literatura revisada, la segunda hipótesis de la investigación es la siguiente:

Hipótesis 2

H2: El crecimiento económico tiene una relación en forma de U invertida con las emisiones de CO₂.

2.3. Densidad de la población urbana y emisiones de CO₂

La teoría que explora la relación entre el crecimiento de la población y calidad ambiental es limitada a pesar del extenso debate que sea generado alrededor de este tema. Sin embargo, es posible diferenciar dos enfoques clásicos que han examinado este vínculo: la teoría malthusiana y el efecto de Simon (Kruse-Andersen, 2023). El primero, desarrollado durante la etapa preindustrial, destaca que el crecimiento poblacional afecta negativamente la calidad ambiental. El aumento de la población intensifica actividades económicas como la agricultura, lo que resulta en una mayor explotación de recursos naturales y el uso de fertilizantes químicos. Estas prácticas conducen a un incremento de la deforestación, erosión y pérdidas de suelo y contaminación de aguas superficiales y subterráneas (Cropper y Griffiths 1994; Novotny 1999; Maja y Ayano, 2021). En

consecuencia, un aumento poblacional provoca un aumento de la producción, empeorando el daño ambiental. Además, implica la expansión de las ciudades y cambios en los modos del tráfico, lo cual agrava la contaminación del aire (Lu et al. 2021). El segundo enfoque, descrito por Simon (1996), sostiene que un aumento de la población conlleva mayores niveles de innovación debido a la expansión y divulgación del conocimiento. Esta situación favorecería el desarrollo de tecnología respetuosa con el medio ambiente (Kruse-Andersen, 2023). Por lo tanto, un mayor crecimiento poblacional tendría efectos positivos en la calidad ambiental (Bretschger 2020).

Los estudios empíricos hasta la actualidad no han proporcionado evidencia concluyente sobre la relación entre densidad poblacional y calidad ambiental. Estos resultados pueden clasificarse en tres categorías diferentes. En primer lugar, algunos estudios sugieren que la densidad población está asociada con una reducción de la contaminación ambiental (por ejemplo, Chen et al. 2020; Wang et al. 2021). Este efecto podría explicarse por el hecho de que un aumento de la población promueve la eficiencia energética (Shao y Wang 2023). En segundo lugar, un grupo distinto evidencia un efecto positivo de la densidad poblacional sobre las emisiones

de CO₂ (por ejemplo, Rahman y Alam 2021; Musah et al. 2021; Wang y Li 2021). En este contexto, el crecimiento de las actividades humanas ha impulsado el crecimiento económico, exacerbando el daño ambiental. Finalmente, un tercer grupo revela un efecto mixto de la densidad poblacional sobre la calidad del medio ambiente. Más precisamente, encuentran evidencia de una relación en forma de U invertida, lo cual sugiere que en etapas tempranas un aumento de la población aumenta la degradación

ambiental. Sin embargo, existe un punto de inflexión, donde un incremento de la población mejora la calidad ambiental (por ejemplo, Gierałowska et al. 2022; Latief et al. 2022).

En la tabla 3, se resumen investigaciones adicionales sobre el vínculo entre densidad poblacional y emisiones de CO₂.

Tabla 3. Estudios empíricos adicionales: Densidad poblacional y emisiones de CO₂

| Autor | País(es), Metodología | Datos, que la | Variable endógena | Variable(s) independiente(s) | Conclusión |
|------------------------|---|---------------|------------------------------|--|---|
| Pickson et al. (2024) | Distintos países por grupos de ingreso; 1993-2018; estimaciones incluyen dependencia transversal. | | Emisiones de CO ₂ | PIB per cápita Tasa de desempleo Envejecimiento de la población Urbanización Esperanza de vida | Densidad poblacional $\xrightarrow{+}$ Emisiones CO ₂ |
| Mendonça et al. (2020) | 50 principales economías del mundo; 1990-2015; modelo de regresión jerárquica. | | Emisiones de CO ₂ | PIB Crecimiento demográfico Energías renovables | Densidad poblacional $\xrightarrow{+}$ Emisiones CO ₂ |
| Chen et al. (2023) | China; 2003-2019; modelos econométricos espaciales. | | Emisiones de CO ₂ | Urbanización | Densidad poblacional $\xrightarrow{\cap}$ Emisiones CO ₂ |

Nota. $\xrightarrow{+}$ efecto positivo; $\xrightarrow{\cap}$ relación U invertida

En relación a la literatura revisada, la tercera hipótesis de la investigación es la siguiente:

Hipótesis 3

H3: La densidad de la población urbana tiene un impacto positivo en las emisiones de CO₂.

2.4. Apertura comercial y emisiones de CO₂

Dada la complejidad de la apertura comercial, que implica una serie de interacciones entre distintos factores, su relación con las emisiones de CO₂ no se ha podido establecer de manera

concluyente (Zhang et al. 2023b). Los argumentos sobre los efectos de la apertura comercial en la calidad del medio ambiente se basan en la hipótesis del “paraíso de la contaminación” (PHH), descrita por Copeland y Taylor (2004). Bajo este enfoque, se pueden diferenciar dos tipos de efectos. El primer efecto es una asociación positiva entre la apertura comercial y las emisiones de CO₂. Esto se debe a que los gobiernos buscan liberar sus economías y promover una mayor integración económica para alcanzar tasas de crecimiento más altas. En consecuencia, implementan estrategias que reducen las regulaciones ambientales, lo que brinda mayor competitividad internacional a las

empresas locales. Además, las mínimas o nulas regulaciones ambientales en países en desarrollo atraen a empresas extranjeras altamente contaminantes, lo cual empeora la calidad ambiental (Ragoubi y Mighri 2021). El segundo efecto es una relación negativa entre la apertura comercial y las emisiones de CO2. Esta relación se enmarca en un

modelo en el cual la apertura comercial permite la transferencia de tecnología ecológica, permitiendo neutralizar las emisiones de CO2 (Liu et al. 2021).

A luz de la base teórica, en la tabla 4, se resumen investigaciones adicionales sobre el vínculo entre apertura comercial y emisiones de CO2.

Tabla 4. Estudios empíricos adicionales: Apertura comercial y emisiones de CO2

| Autor | País(es), Metodología | Datos, Variable endógena | Variable(s) independiente(s) | Conclusión |
|-----------------------|---|-----------------------------|---|--|
| Khan et al. (2022b) | 176 países; 2000-2019; mínimos cuadrados ordinarios de panel (OLS) y método generalizado de momentos. | Emisiones de CO2 per cápita | Apertura comercial Innovación, Calidad institucional, Inversión extranjera directa Desarrollo financiero Consumo de energía renovable y no renovable | Apertura comercial $\xrightarrow{-}$ Emisiones CO2 |
| Wenlong et al. (2023) | 10 países asiáticos; 1995-2018; modelo de rezago distribuido autorregresivo aumentado transversalmente (CS-ARDL). | Gases de efecto invernadero | Eficiencia energética Innovaciones tecnológicas Apertura comercial Calidad institucional | Apertura comercial $\xrightarrow{+}$ gases de efecto invernadero |
| Li et al. (2021) | China; 1989-2019; series temporales. | Emisiones de CO2 | Apertura comercial Diversificación de las exportaciones Producción de electricidad renovable | Apertura comercial $\xrightarrow{+}$ Emisiones CO2 |

Nota. $\xrightarrow{+}$ efecto positivo; $\xrightarrow{-}$ efecto negativo

En relación a la literatura revisada, la cuarta hipótesis de la investigación es la siguiente:

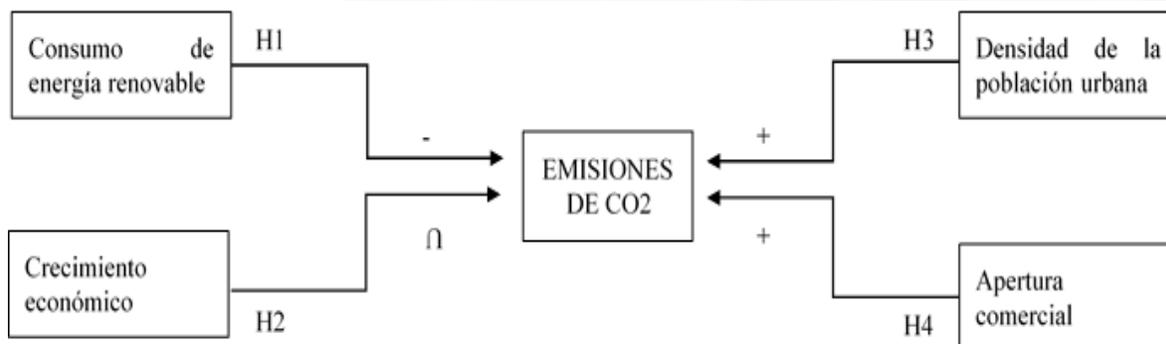
Hipótesis 4

H4: La apertura comercial tienen un impacto positivo en las emisiones de CO2.

Con el propósito de resumir y esclarecer las hipótesis establecidas en esta sección, se presenta la figura 1. En ella, se expone el marco teórico que relaciona las energías renovables, el crecimiento

económico, la densidad de la población urbana y la apertura comercial con las emisiones de CO2. En este contexto, la transición hacia energías sostenibles a través del consumo de energías renovables para reducir las emisiones de CO2 se representa en la Hipótesis 1. Por otro lado, las actividades humanas y económicas que afectan el medio ambiente se abordan en las Hipótesis 2, 3 y 4.

Figura 1. Hipótesis de la investigación



2.5. Limitaciones en la literatura

A pesar de que existe una variedad de literatura que examina los efectos de la energía renovable en la calidad del medio ambiente, aún persisten limitaciones importantes. En primer lugar, numerosas investigaciones han enfocado su atención en países en desarrollo o economías emergentes, donde la adopción de energías renovables sigue siendo un desafío importante en términos de accesibilidad y asequibilidad. Mientras que los estudios orientados a economías desarrolladas han mostrado una limitada sección transversal, lo cual puede generar ambigüedad en los hallazgos. En segundo lugar, la heterogeneidad presente, principalmente en estudios que abarcan amplias muestras de países, puede generar inconsistencias debido a los diferentes contextos económicos, sociales, y hasta políticos que pueden influir en la relación de las variables. A luz de estas limitaciones, la presente investigación busca contribuir con la literatura al examinar el efecto de las energías renovables en las emisiones de CO₂ de 30 países de alto ingreso, los cuales enfrentan otros desafíos respecto al potencial de las energías limpias. Además, para superar posibles sesgos debido a la heterogeneidad no observada, se subdivide el panel en los principales 15 países emisores de CO₂ de este grupo, lo cual permita profundizar el análisis sobre la magnitud de las energías renovables.

3. METODOLOGÍA

3.1. Descripción de las variables y datos

El presente artículo utiliza datos de panel de 30 países de alto ingreso, según la clasificación del Banco Mundial, durante el periodo de 2000 a 2020 para examinar los efectos de corto y largo plazo de las energías renovables en las emisiones de CO₂ (los países incluidos en el análisis se enumeran en el Apéndice A.1). Los países fueron seleccionados debido a la disponibilidad de la información para construir un panel balanceado y, especialmente, por los desafíos relacionados con la capacidad de las energías renovables para satisfacer la demanda energética de las actividades económicas en países donde la estructura industrial tiene un alto desarrollo. Las variables a utilizar fueron seleccionadas mediante la revisión de la literatura descrita en la sección 2, y obtenidas de la base de datos del Banco Mundial. La variable dependiente se define como las emisiones de CO₂ per cápita. En cuanto a las variables explicativas, estas incluyen el consumo de energías renovables per cápita (E_r), el Producto Interno Bruto per cápita real (C_e) como variable de crecimiento económico, el cuadrado del Producto Interno Bruto real per cápita (C_e^2), para (in)validarla la hipótesis EKC, la población urbana (U) y la apertura comercial (T_o). Se presenta en la tabla 5, la descripción de cada variable, incluyendo su unidad de medida y fuente.

Tabla 5. Descripción de las variables

| Variable | Abreviatura | Descripción | Fuente |
|-----------------------------------|-------------|---|-------------------------------------|
| Emisiones de CO2 | CO2 | Emisiones de dióxido de carbono (tonelada métrica per cápita) | Indicadores del Banco Mundial (WDI) |
| Consumo de energía renovable | Er | Consumo de energía renovable (% del consumo final de energía total) | |
| Crecimiento económico | Ce | PIB per cápita (\$ constantes de 2015) | |
| Crecimiento económico al cuadrado | Ce2 | Cuadrado del PIB per cápita (\$ constantes de 2015) | |
| Población Urbana | Urb | Población del área urbana (% población total) | |
| Apertura comercial | To | Exportaciones más importaciones (% del PIB) | |

Siguiendo los trabajos de Li y Hameklaus (2022) y Wang et al. (2023b), se utiliza las emisiones de CO2 (toneladas métricas per cápita) provenientes de la quema de combustibles fósiles, que incluye la quema de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, y la quema de gas. Además, las emisiones de CO2 per cápita permiten dimensionar la magnitud en relación al tamaño poblacional, lo cual proporciona una perspectiva más adecuada sobre el impacto del medio ambiente.

El porcentaje de consumo de energía renovable muestra la porción de energías limpias utilizadas, lo cual permite dimensionar su importancia relativa. El PIB per cápita real y el cuadrado de esta variable han sido utilizadas ampliamente en la literatura para examinar la hipótesis EKC, que describe una relación no lineal entre el crecimiento económico y la calidad del medio ambiente (por ejemplo, Ahmad et al. 2023; Zhang et al. 2020; Zhang et al. 2022). En lo referente a la densidad de la población, la población urbana ha sido tradicionalmente utilizada, con el objetivo de captar la aglomeración poblacional en un área condicionante del estrés ambiental (por ejemplo, Rahman y Alam 2021). Finalmente, la apertura comercial es medida como la suma de las exportaciones e importaciones en porcentajes del PIB, lo cual permite

evaluar su impacto en la economía en general.

En la tabla 6, se presenta un resumen de las estadísticas descriptivas de cada variable. La media, mediana, desviación estándar, mínimo y máximo de cada variable se encuentran entre las columnas (1) y (5). Los valores promedios de las emisiones de CO2, el consumo de energía renovable, el crecimiento económico, la población urbana y la apertura comercial durante el periodo de estudio son 8.62 (tm per cápita), 17.27 (% consumo de energía total), 36.436.12 dólares, 98.43 (% población total) y 75.02 (% PIB), respectivamente. De las variables analizadas, el crecimiento económico es la que presenta mayor variabilidad, con un mínimo de 4.567.24 dólares y un máximo de 112.417.9 dólares. Además, también se observa una diferencia significativa entre los valores mínimos y máximos de emisiones de CO2, lo cual revela una posible heterogeneidad en la estructura de panel. En la columna (6) se presenta el test de Levene para determinar la estabilidad de varianza de las series. La hipótesis nula del test es homogeneidad de varianza de las variables. Se observa que los p-valores de todas las variables son menores al 5%, por lo que se rechaza la hipótesis nula, y se evidencia que las series no son estables en varianza. Por lo

tanto, para estabilizar las series se aplica una transformación logarítmica a todas las variables (Box y Cox 1964).

Tabla 6. Estadísticas descriptivas de las variables

| Variable | Observaciones | Media | Mediana | Desviación estándar | Mínimo | Máximo | Levene |
|----------|---------------|-----------|-----------|---------------------|----------|-----------|----------|
| | | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
| CO2 | 630 | 8.62 | 7.72 | 4.25 | 3 | 25.61 | 27.80*** |
| Er | 630 | 17.27 | 14.18 | 14.85 | 0.69 | 82.79 | 6.45*** |
| Ce | 630 | 36.436.12 | 36.039.52 | 21.287.01 | 4.567.24 | 112.417.9 | 22.67*** |
| Ce2 | 630 | 1.78e+09 | 1.30e+09 | 2.17e+09 | 2.09e+07 | 1.26e+10 | 4.88*** |
| Urb | 630 | 75.02 | 78.16 | 13.12 | 50.75 | 98.08 | 9.67*** |
| To | 630 | 98.43 | 83.10 | 57.87 | 19.56 | 382.35 | 11.52*** |

Nota: ***p<0,01

3.2. Construcción del modelo

Siguiendo el marco metodológico propuesto por York et al. (2003) y aplicados por Amer et al. (2024) y Shabani (2024) para representar los impactos ambientales derivados de las actividades humanas, el modelo empírico para determinar los efectos del consumo de energías renovables y otras variables representativas de las actividades humanas y económicos, como el crecimiento económico en forma no lineal, la apertura comercial y la densidad de la población urbana sobre las emisiones de CO2 se lo representa de la siguiente manera:

$$CO2_{it} = f(Er_{it}, Ce_{it}, Ce2_{it}, Urb_{it}, To_{it}) \quad (1)$$

En la ecuación (1), i denota el país ($i = 1, \dots, 30$) y t el periodo ($t = 2000, \dots, 2020$). La variable dependiente son las emisiones de CO2 per cápita ($CO2_{it}$) del país i en el periodo t . Por otro lado, las variables independientes incluyen el consumo de energía renovable (Er_{it}), el crecimiento económico (Ce_{it}), el crecimiento económico al cuadrado ($Ce2_{it}$), la densidad de la población urbana (Urb_{it}) y la apertura comercial (To_{it}). La extensión econométrica del modelo se expresa en la ecuación (2), utilizando las variables en su forma logarítmica:

$$\begin{aligned} LnCO2_{it} = & \beta_0 - \beta_1 LnEr_{it} + \beta_2 LnCe_{it} \\ & - \beta_3 LnCe2_{it} + \beta_4 LnUrb_{it} \\ & + \beta_5 LnTo_{it} + \mu_{it} \end{aligned} \quad (2)$$

En la ecuación (2), β_0 corresponde a la constante del modelo, y β_1, \dots, β_5 , representan las elasticidades parciales a ser estimadas en relación a cada variable independientes, mientras que μ_{it} es el termino de perturbación estocástica. Con base a la literatura revisada en la sección 2, se espera que el consumo de energía renovable se asocie negativamente con las emisiones de CO2. Además, se espera que los coeficientes de $\beta_2 > 0$ y $\beta_3 < 0$, lo cual estaría relacionado con la hipótesis EKC. Finalmente, se espera una relación positiva entre la densidad de la población urbana y apertura comercial con las emisiones de CO2.

3.3. Estrategia econométrica

Con base en Ahmad et al. (2023) y Li y (2022), para analizar los efectos de corto y largo plazo del consumo de energías renovables, el crecimiento económico, la densidad de la población urbana y la apertura comercial sobre las emisiones de CO2, se emplea el modelo de panel de rezago distribuido autorregresivo transversales (CS-ARDL). Siguiendo a Uddin et al. (2023), para su estimación se deben realizar análisis preliminares, como

pruebas de dependencia transversal, homogeneidad de pendientes, estacionariedad y co-integración. El propósito de estas pruebas es determinar la idoneidad del modelo CS-ARDL, que por sus características es robusto frente a la dependencia transversal y ordenes de integración mixto, I(0) y I(1). Además, se realizan controles de robustez mediante la aplicación de la técnica de Grupo de Media Aumentada (AMG), que es reconocida por su eficiencia ante problemas de dependencia transversal y heterogeneidad de pendiente (Eberhardt y Bond. 2009).

Este procedimiento será aplicado tanto al panel completo conformado por 30 países de alto ingreso, como el sub-panel conformado por los principales 15 países emisores de CO2, seleccionados por presentar los promedios más altos de emisiones de CO2 durante el periodo de análisis.

3.3.1. Pruebas de dependencia transversal y homogeneidad de pendientes

Varios estudios que han examinado los diversos determinantes de las emisiones de CO2 basados en componentes macroeconómicos en datos de panel han resaltado la importancia de abordar la dependencia trasversal de errores para evitar estimaciones inconsistentes (Yadav et al. 2024). Siguiendo a Perone (2024), en este estudio se emplea la prueba CD de Pesaran, la cual se describe como una prueba de diagnóstico simple y aplicable a diferentes estructuras de datos de panel (Pesaran, 2021). La especificación de esta prueba se la describe en la ecuación (3) (Pesaran 2021, 19):

$$CD = \sqrt{\frac{2T}{N(N-1)}} \left(\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \hat{\rho}_{ij} \right) \quad (3)$$

Donde, T representa la dimensión temporal, N las secciones transversales

del panel, y $\hat{\rho}_{ij}$ es la correlación por pares de los residuos entre las secciones i y j , que denotan las unidades de estudio.

Además, dada la posible heterogeneidad en el panel de datos, es crucial complementar el análisis de dependencia transversal con pruebas de homogeneidad de pendiente. En este sentido, se emplea la prueba de homogeneidad de pendiente de Swamy (SH) para datos de panel con múltiples observaciones en la sección transversal y temporal, presentada por Pesaran y Yamagata (2008).

3.3.2. Pruebas de raíz unitaria y cointegración

Determinar la estacionariedad de las series es un requisito previo para la estimación de las relaciones de largo plazo, con el fin de evitar posibles sesgos en la estimación (Li y Haneklaus 2022). Sin embargo, las pruebas de raíces unitarias de primera generación, al asumir la independencia transversal (Rahman et al. 2023), pueden llevar a inferencias incorrectas sobre el orden de integración de las variables. Por este motivo, se emplean pruebas de raíces unitarias de segunda generación, que consideran la dependencia transversal. Específicamente, se emplea las pruebas de Im Pasaran y Shin (CIPS) y la prueba de Dicky Fuller aumentada transversalmente (CADF) (Im et al. 2003; Pesaran 2007). Bajo la especificación de la ecuación (4), se determina la prueba CADF:

$$\Delta V_{it} = \varphi_i + \varphi_i V_{it-1} + \varphi_i \bar{K}_{t-1} + \sum_{i=0}^p \varphi_{i1} \Delta \bar{V}_{t-1} + \sum_{i=0}^p \varphi_{i2} \Delta V_{t-1} + e_{it} \quad (4)$$

Donde, \bar{K}_{t-1} y $\Delta \bar{V}_{t-1}$ representa el promedio transversal. Mientras tanto, la prueba CIPS se la expresa en la ecuación (5).

$$CIPS(N, T) = N^{-1} \sum_{i=1}^N t_i(N, T) \quad (5)$$

Una vez determinado el orden de integración de las variables, se verifica la existencia de relaciones de equilibrio en el largo plazo (cointegración). Para ello se utilizan las pruebas de cointegración de Pedroni (2001) y la prueba de Kao (2001), para proporcionar resultados sólidos.

3.3.3. Modelo de Panel de Rezago Distribuido Autorregresivo transversales (CS-ARDL)

Para estimar las relaciones de corto y largo plazo entre el consumo de energía renovable y las emisiones de CO₂, se emplea el modelo de panel de rezago distribuido autorregresivo transversal (CS-ARDL), propuesto por Chudik y Pesaran (2015). Varios estudios optan por el modelo CS-ARDL debido a sus diferentes ventajas, especialmente por sus características de abordar series con un orden de integración mixto, I(0) o I(1). Además, esta técnica es robusta frente a problemas de endogeneidad, heterogeneidad de panel, y dependencia de la sección transversal (Kassouri y Alola 2023; Uddin et al. 2023). De esta manera, el modelo CS-ARDL se lo expresa en la ecuación (6).

$$\Delta CO2_{it} = \delta_i + \sum_{g=1}^p \bar{\delta}_{it} \Delta CO2_{i,t-1} + \sum_{g=0}^q \bar{\delta}_{it} \Delta X_{i,t-1} + \sum_{g=1}^w \bar{\delta}_{it} \bar{CS}_{i,t-1} + \mu_{it} \quad (6)$$

En la ecuación (6), $CO2_{i,t}$ representa las emisiones de CO₂ en el país i (1, ..., 30) en el año t (2000, ..., 2020). X_{it} es el vector de las variables independientes en su forma logarítmica ($LnEr$, $LnCe$, $LnCe2$, $LnUrb$,

$LnTo$), \bar{CS}_i , representa la media de la sección transversal, p , q , w , son los rezagos óptimos y μ_{it} es el termino de perturbación estocástica.

3.3.4. Controles de robustez

Para corroborar los resultados del modelo CS-ARDL se aplica la técnica de Grupo de Media Aumentada (AMG) (Eberhardt y Bond. 2009). Esta técnica es utilizada para abordar la dependencia transversal, por lo que su complementariedad con el modelo CS-ARDL permiten generar resultados consistentes. El estimador AMG es más eficiente frente al grupo de media (MG), ya que permite que los coeficientes varíen tanto en la sección transversal y temporal, haciendo de las estimaciones más confiables (Hwang y Díez 2024).

4. Hallazgos empíricos y discusión de resultados

4.1. Estimaciones previas al modelo CS-ARDL

Inicialmente, se utilizan la prueba de dependencia transversal (CD) de Pesaran (2021) y la prueba de homogeneidad de pendiente (SH) de Pesaran y Yamagata (2008) como pruebas preliminares de rigurosidad. Los resultados de la prueba CD, tanto para el panel completo como para el subpanel, se muestran en la tabla 7. Estos resultados indican significancia al 1% para ambos paneles, lo que permite rechazar la hipótesis nula de independencia transversal. Además, en la tabla 8 se presentan los resultados de la prueba SH, donde la hipótesis nula se refiere a que los coeficientes de pendiente son homogéneos. Dado que los valores Δ y Δ_{Adj} son significativos al 1% para ambos paneles, se determina que hay evidencia suficiente para señalar la presencia de heterogeneidad de pendiente en las series.

Tabla 7. Prueba de dependencia transversal

| Variables | Pasaran CD | |
|-----------|----------------|----------|
| | Panel completo | Subpanel |
| LnCO2 | 24.09*** | 11.72*** |
| LnRe | 4.13*** | 0.051 |
| LnCe | 13.54*** | 5.17*** |
| LnCe2 | 13.04*** | 4.98*** |
| LnUrb | 5.51*** | 1.20 |
| LnOt | 21.28*** | 5.88*** |

Nota: ***p<0,01

Tabla 8. Prueba de homogeneidad de pendiente

| | Panel completo | Subpanel |
|-----------------|----------------|----------|
| Δ | 10.43*** | 6.62*** |
| $\Delta_{Adj.}$ | 13.46*** | 8.54*** |

Nota: ***p<0.01

Posterior a las pruebas de dependencia transversal y de homogeneidad de pendiente, se realizan pruebas de estacionariedad de segunda generación, dadas sus características de considerar la dependencia transversal. Específicamente, se emplean las pruebas CIPS y CADF introducidas por Im et al. (2003) y Pesaran (2007). La hipótesis nula es que las variables no son estacionarias para ambas pruebas. Los resultados de las pruebas de estacionariedad se presentan en la tabla 9. Para el panel completo, los resultados

de las pruebas CIPS y CADF muestran que las energías renovables son estacionarias en niveles I(0), mientras que el resto de las variables son estacionarias en primeras diferencias I(1). En lo referente al subpanel, ambas pruebas muestran que todas las variables son estacionarias en primeras diferencias o integradas de orden I(1).

Una vez determinado el orden de integración de las series, es indispensable determinar la existencia de relaciones de equilibrio en el largo plazo entre las variables (cointegración). Para ello se utilizan las pruebas de cointegración de Pedroni (2001) y Kao (2001). La complementariedad de ambas pruebas es adecuada para determinar cointegración, tanto en paneles heterogéneos como homogéneos (Rahman et al. 2023). La hipótesis nula de estas pruebas es que no existe cointegración. Los resultados se presentan en la tabla 10. Las estadísticas de ambas pruebas alternativas de cointegración muestran niveles de significancia del 1% y 5% para ambos paneles, lo que evidencia la existencia de una relación de equilibrio a largo plazo entre las variables.

Tabla 9. Pruebas de estacionariedad

| Variables | Panel completo | | Subpanel | |
|-------------------------|----------------|----------|----------|----------|
| | CIPS | CADF | CIPS | CADF |
| LnCo2 | -1.83 | -1.68 | -1.66 | -1.55 |
| LnRe | -2.38*** | -2.17*** | -1.91 | -2.03 |
| LnCe | -1.66 | -1.75 | -1.42 | -1.51 |
| LnCe2 | -1.61 | -1.72 | -1.40 | -1.49 |
| LnUrb | -1.53 | -1.73 | -0.97 | -1.27 |
| LnOt | -1.63 | -1.84 | -1.90 | -1.91 |
| En niveles | | | | |
| LnCo2 | -4.21*** | -3.15*** | -4.23*** | -4.23*** |
| LnRe | - | - | -4.06*** | -4.06*** |
| LnCe | -2.87*** | -2.08** | -2.71*** | -2.71*** |
| En primeras diferencias | | | | |

| | | | | |
|-------|----------|----------|----------|----------|
| LnCe2 | -2.86*** | -2.07** | -2.71*** | -2.71*** |
| LnUrb | -2.40*** | -2.41*** | -2.35** | -2.35** |
| LnOt | -3.12*** | -2.51*** | -3.54*** | -3.54*** |

Nota: ***p<0.01; **p<0.05.

Tabla 10. Prueba de cointegración

| | | Panel completo | Subpanel |
|--------------|----------------------------|----------------|----------|
| Pedroni test | Modified Phillips-Perron t | 3.21*** | 2.68*** |
| | Phillips-Perron t | -3.44*** | -0.97 |
| | Augmented Dickey-Fuller t | -2.82*** | -0.06 |
| Kao test | Augmented Dickey-Fuller t | 3.06*** | 2.17** |
| | Unadjusted Dickey-Fuller t | 3.74*** | 3.09*** |

Nota: ***p<0.01; **p<0.05

4.2. Estimación de relaciones de corto y largo plazo: Modelo de Rezagos Distribuidos Autorregresivos Transversales (CS-ARDL)

A partir de las pruebas preliminares, se ha determinado que existe dependencia transversal, heterogeneidad de pendientes, las variables presentan un orden de integración mixto entre I(0) y I(1) y que cointegran. Estos resultados indican que la selección del modelo CS-ARDL es adecuada para examinar las relaciones de corto y largo plazo entre las energías renovables y las emisiones de CO₂.

En la tabla 11 se presentan los efectos de corto y largo plazo de las variables explicativas sobre las emisiones de CO₂ de los países de alto ingreso. En primer lugar, el término de corrección de error (ECT₋₁) es negativo y significativo en ambos paneles, lo que confirma la existencia de relaciones de equilibrio a largo plazo. Para el panel completo, se observa que, tanto en el corto como en el largo plazo, un incremento del 1% en el consumo de energías renovables se asocia con una reducción de las emisiones de CO₂ de 0.397% y 0.36%, respectivamente. Esta asociación es consistente en el subpanel, donde el

consumo de energías renovables también es significativo para reducir las emisiones de CO₂; sin embargo, sus coeficientes son de menor magnitud, 0.22% y 0.19%, respectivamente. Esta diferencia en las magnitudes puede explicarse por los distintos niveles de intensidad en las emisiones de CO₂ entre los países. En países con mayores niveles de CO₂, la capacidad de mitigación de las energías renovables se reduce. De esta manera, las energías renovables emergen como una alternativa potencial para neutralizar las emisiones de CO₂ provenientes de las actividades humanas y económicas (Balsalobre-Lorente et al. 2023).

Además, los resultados indican que el crecimiento económico tiene un efecto positivo y significativo, tanto en el corto como a largo plazo, sobre las emisiones de CO₂. Un aumento del 1% en el crecimiento económico genera un sustancial incremento de las emisiones de CO₂ per cápita del 30.52% y 28.97%, respectivamente en el panel completo. Este efecto, como era de esperarse, es de mayor magnitud en los principales 15 países emisores de CO₂, donde los coeficientes alcanzan valores del 50.86% y 56.04%. Efectos similares fueron encontrados por Li y Haneklaus (2021, 2022) y Tchouto (2023). Por otro lado, el

coeficiente estimado del crecimiento económico al cuadrado para ambos paneles, a corto y largo plazo, es negativo con niveles de significancia del 5% y 10%. Estos hallazgos muestran una relación no lineal entre el crecimiento económico y las emisiones de CO₂, proporcionando evidencia que respalda la hipótesis EKC en los países del alto ingreso. Por lo tanto, se confirma que en las etapas tempranas de crecimiento económico se genera una alta degradación ambiental. Sin embargo, existe un umbral máximo a partir del cual el proceso de crecimiento alcanza niveles adecuados de desarrollo que permiten mitigar el daño ambiental.

El impacto de la densidad de la población urbana en las emisiones de CO₂, tanto en el panel completo como en el subpanel, a largo plazo es positivo, pero no significativo. A pesar de la debilidad

estadística, esta dirección positiva se alinea con otras investigaciones (Ridwan et al. 2024; Pickson et al. 2024; Mendonça et al. 2020). De esta manera, las presiones del aumento de la densidad urbana podrían generar estrés en el medio ambiente.

La apertura comercial es un condicionante importante de las emisiones de CO₂. De acuerdo a los resultados del panel completo, en el largo plazo, un aumento del 1% de la apertura comercial conduce a un incremento de las emisiones de CO₂ en un 0.23%. En el subpanel, el efecto positivo persiste, aunque no es estadísticamente significativo. Además, estos impactos son consistentes en el corto plazo. Este hallazgo se alinea con los trabajos de Li y Haneklaus (2021) y Wenlong et al. (2023).

Tabla 11. Efectos de corto y largo plazo: CS-ARDL

| Variables | Panel completo | Subpanel |
|---------------------|---------------------|---------------------|
| | A corto plazo | |
| LnCO2 ₋₁ | -0.12** (0.05) | -0.11 (0.08) |
| LnRe | -0.397*** (0.10) | -0.22*** (0.08) |
| LnCe | 30.52* (16.36) | 50.86** (21.882) |
| LnCe2 | -1.40* (0.77) | -2.32** (1.00) |
| LnUrb | -3.37 (10.66) | 5.31 (18.64) |
| LnOt | 0.25*** (0.09) | 0.14 (0.097) |
| ECT ₋₁ | -1.12*** (0.05) | -1.11*** (0.08) |
| | A largo plazo | |
| LnRe | -0.36*** (0.10) | -0.19*** (0.06) |
| LnCe | 28.97** (14.73) | 56.04** (24.18) |
| LnCe2 | -1.33* (0.69) | -2.53** (1.08) |
| LnUrb | 1.35 (8.32) | 10.05 (15.76) |
| LnOt | 0.23*** (0.09) | 0.14 (0.1) |

Nota: ***p<0,01; **p<0,05; *p<0,1. Error estándar entre paréntesis

4.3. Control de robustez

Para proporcionar evidencia sólida y confirmar los resultados del modelo CS-ARDL, se emplea el modelo de Grupo de Media Aumentada (AMG), utilizado como técnica complementaria en presencia de dependencia transversal (Wenlong et al. 2023). Los resultados del modelo AMG se presentan en la tabla 12. Los hallazgos son consistentes, donde se confirma el efecto mitigador de las energías renovables sobre las emisiones de CO₂, la relación no lineal en forma de U invertida entre el crecimiento económico y el daño ambiental, y la dirección positiva de la apertura comercial sobre las emisiones de CO₂. En lo referente a la densidad urbana, persiste la no significancia, lo cual se alinea con la ambigüedad teórica, donde no existe un efecto concluyente.

Tabla 12. Estimación de robustez: AMG

| Variables | Full panel Coefficients | Subpanel |
|-----------|----------------------------|--------------------|
| LnRe | -0.31*** (0.08) | -0.21*** (0.07) |
| LnCe | 26.35* (13.83) | 34.19 (23.34) |
| LnCe2 | -1.17* (0.63) | -1.48 (1.04) |
| LnUrb | -10.65 (12.63) | -29.32 (21.41) |
| LnOt | 0.12*** (0.03) | 0.14** (0.04) |
| Const | -0.05*** (0.013) | 0.014 (0.015) |

Nota: ***p<0,01; **p<0,05; *p<0,1. Error estándar entre paréntesis

4.4. Discusión de resultados

En la tabla 13, se presenta un resumen de los hallazgos en relación a las hipótesis descritas en la sección 2.

Tabla 13. Resumen de resultados y validación de hipótesis

| Hipótesis nula | Hallazgo | Conclusión |
|---|------------------------------|----------------|
| H1 Las energías renovables tienen un impacto negativo en las emisiones de CO ₂ . | $Er \xrightarrow{-} CO_2$ | No rechaza H1 |
| H2 El crecimiento económico tiene una relación en forma de U invertida con las emisiones de CO ₂ | $Ce \xrightarrow{\cap} CO_2$ | No rechaza H2 |
| H3 La densidad de la población urbana tiene un impacto positivo en las emisiones de CO ₂ | $Urb \xrightarrow{NON} CO_2$ | No concluyente |
| H4 La apertura comercial tienen un impacto positivo en las emisiones de CO ₂ | $To \xrightarrow{+} CO_2$ | No rechaza H4 |

Hallazgos: $\xrightarrow{-}$ efecto negativo; $\xrightarrow{\cap}$ relación U invertida; \xrightarrow{NON} efecto no significativo; $\xrightarrow{+}$ relación positiva.

Esta investigación proporciona un análisis dinámico para examinar los efectos de corto y largo plazo del consumo de energías renovables, el crecimiento económico, la densidad de la población urbana y la apertura comercial sobre las emisiones de CO₂ en países de alto ingreso. El primer hallazgo revela el impacto negativo del consumo de energías renovables sobre las emisiones de CO₂, lo que respalda la hipótesis H1. Este hallazgo es consistente con la

literatura previa (por ejemplo, Shabani, 2024; Amer et al. 2024; Işık et al. 2024; Yang y Umar 2022) y puede explicarse por varias razones bien documentadas. Las energías renovables, dadas sus características naturales, no generan emisiones nocivas al medio ambiente, lo cual permite mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de la quema de combustibles fósiles (Wang et al. 2024). Además, fomentan inversiones en innovación tecnológica,

contribuyendo así a generar cambios estructurales a nivel económico y social mediante la canalización de recursos hacia sectores de mayor eficiencia energética (Nepal et al. 2024). La generación de energías renovables también puede reducir la dependencia de las importaciones netas de petróleo (Adekoya et al. 2022), incrementando así la seguridad e independencia energética. Finalmente, los países desarrollados se caracterizan por tener mayores niveles de educación, lo cual influye positivamente en la aceptación y utilización de energías renovables y, a la vez, ha generado cambios de cultura hacia la conservación ambiental (Shabani, 2024). En consecuencia, el potencial de las energías renovables, principalmente la solar, eólica e hidroeléctrica, para sustituir a las energías convencionales se refleja en los esfuerzos de los formuladores de políticas públicas por buscar mecanismos técnicos y financieros para su adaptación (Nassar et al. 2024).

Otro hallazgo relevante es la relación no lineal en forma de U invertida entre el crecimiento económico y emisiones de CO₂. Este hallazgo respalda los resultados de estudios anteriores sobre la Curva Ambiental de Kuznet (EKC) (Ridzuan et al. 2020; Wang et al. 2024; Zhang et al. 2022) y contradice a otros (Islama et al. 2023; Kanlı y Küçükefe 2023). En la línea de Li y Haneklaus (2021, 2022) y Tchouto (2023), se revelan impactos sustanciales del crecimiento económico sobre las emisiones de CO₂, principalmente en los principales países contaminantes. La explicación de este efecto radica en los patrones de intensidad energética motivados por las actividades económicas, especialmente por la industrialización (Rahman et al. 2023). En las primeras etapas de cambio estructural, los factores de producción se trasladan hacia sectores de mayor intensidad, como el sector manufacturero. Por lo tanto, a medida que la industrialización crece, el uso de energías no renovables aumenta, incidiendo en la degradación ambiental (Rahman y Alam

2022c). Sin embargo, a medida que el crecimiento económico se acelera, la incorporación de tecnologías y la eficiencia energética se expanden, lo cual ayuda a reducir la intensidad de las emisiones de CO₂ (Rahman et al. 2023).

En lo que respecta a la densidad de la población urbana, no ha sido posible encontrar evidencia estadísticamente significativa que valide o invalide la hipótesis H3, por lo que su efecto en los países de alto ingreso no es concluyente. Sin embargo, la relación en el largo plazo muestra una asociación positiva, lo cual era esperado en relación a literatura previa (Pickson et al. 2024; Mendonça et al. 2020). Una mayor densidad poblacional, especialmente en áreas de alta aglomeración, pueden aumentar las emisiones de CO₂ debido a la intensificación de actividades económicas como la agricultura o la expansión de las ciudades, que agraven el daño ambiental (Cropper y Griffiths 1994; Lu et al. 2021).

Finalmente, se evidencia que la apertura comercial conduce a un incremento de las emisiones de CO₂ en los países de alto ingreso en el corto y largo plazo. Siguiendo a Li y Haneklaus (2021), un mayor comercio internacional provoca que la capacidad productiva se expanda, derivando en un aumento de las importaciones lo cual causaría un incremento considerable de las emisiones de CO₂.

5. CONCLUSIONES E IMPLICACIONES DE POLÍTICA ECONÓMICA

El calentamiento global es un tema de gran interés debido a los desafíos ambientales que el mundo enfrenta en la actualidad. Diversos factores económicos, sociales, políticos e institucionales condicionan la agenda del desarrollo sostenible, por lo que es fundamental ampliar los análisis empíricos. En este contexto, el presente estudio aporta a la literatura en examinar

exhaustivamente factores relevantes que inciden en la calidad del medio ambiente. Se ha investigado los efectos de corto y largo plazo del consumo de energías renovables, el crecimiento económico, la densidad de la población urbana y la apertura comercial sobre las emisiones de CO₂.

Con base en los estudios de Li y Haneklaus (2021), Wang et al. (2023b) y Ahmad et al. (2023), se construyeron cuatro hipótesis. En primer lugar, se propuso una relación inversa entre el consumo de energías renovables con las emisiones de CO₂. En segundo lugar, se planteó una relación no lineal en forma de U invertida entre crecimiento económico y las emisiones de CO₂. En tercer lugar, se consideró una relación positiva de la densidad urbana y la apertura comercial con las emisiones de CO₂. Para evaluar estas hipótesis, se estimó un modelo de rezagos distribuidos autorregresivos transversales (CS-ARDL) para 30 países de alto ingreso durante el periodo 2000 a 2020. El modelo especificado fue adecuado debido a su capacidad para manejar la presencia de dependencia transversal, heterogeneidad de pendiente, un orden mixto de estacionariedad y cointegración. Además, se aplicó un estimador de Grupo de Media Aumentada (AMG) para corroborar los resultados.

Los hallazgos de la investigación relevaron que el consumo de energías renovables tiene un efecto negativo y significativo en las emisiones de CO₂ tanto a corto como a largo plazo. Específicamente, se estimó que un aumento del 1% en el consumo de energías renovables reduce las emisiones de CO₂ en un 0.36% en el largo plazo. Este resultado evidencia el potencial de las energías renovables, como la solar, eólica e hidroeléctrica, para promover la sostenibilidad ambiental. En consecuencia, los costos inherentes a la implementación de energías limpias se justifican en diferentes escenarios, y su posible impacto sobre el impulso de la

eficiencia energética hacen que su capacidad para satisfacer la demanda energética sea factible.

Otro hallazgo relevante fue la asociación no lineal en forma de U invertida entre el crecimiento económico y las emisiones de CO₂, validando la hipótesis ECK, tanto a corto como a largo plazo, presentada por Grossman y Krueger (1991). Se evidenció que en las primeras etapas de crecimiento económico, un aumento del nivel de ingreso per cápita está acompañado de la degradación del medio ambiente. Sin embargo, al llegar a un umbral máximo, el proceso de crecimiento económico alcanza un punto de desarrollo donde se generan cambios en la estructura productiva, se incorporan tecnologías amigables con el medioambiente y crecen las preocupaciones ambientales, lo que resulta en una disminución de las emisiones de CO₂.

También se evidenció que la apertura comercial incrementa las emisiones de CO₂ en el corto y largo plazo, en un 0.25% y 0.23%, respectivamente. Este resultado indica que las tendencias crecientes de las actividades de comercio internacional hacen que las capacidades productivas incrementen, generando una mayor intensificación en el uso de materias primas y energías tradicionales, lo cual afectaría la calidad ambiental. Por otro lado, este impacto revela que el comercio internacional no promueve la transferencia de tecnología eficiente para actuar como mitigador de las emisiones de CO₂, lo cual es preocupante frente a los altos índices de globalización mundial. Finalmente, no se encontró evidencia suficiente para determinar los impactos de la urbanización, por lo que se debe profundizar los estudios en torno a esta relación.

Implicaciones políticas

Los hallazgos de la investigación ofrecen información crucial para la generación de políticas públicas para promover la sostenibilidad ambiental. En primer lugar,

las energías renovables son una alternativa viable para mitigar los efectos negativos de las actividades humanas y económicas sobre el medio ambiente, especialmente en los países más contaminantes. Por ello, se deben generar políticas públicas que incentiven el consumo de energías renovables. Además, para promover una mayor accesibilidad a este tipo de energías, resulta urgente un incremento de la inversión en infraestructura, donde se aprovechen las condiciones climáticas de cada país. Para ello, es importante la generación de asociaciones entre el sector público y privado, que permitan hacer de este sector autosuficiente en el tiempo.

En segundo lugar, existe la posibilidad de patrones de crecimiento económico sostenible. Sin embargo, es importante que dentro de estos procesos se genere una canalización de recursos hacia sectores de mayor eficiencia energética, que permitan un desarrollo integral con la naturaleza. De esta manera, la planificación pública debe ser fortalecida e inducida a rediseñar los mecanismos de control ambiental. Además, es importante promover la optimización de las finanzas públicas, e incrementar recursos hacia la investigación y desarrollo tecnológico en las universidades, y hacer de estas una ventaja competitiva en el futuro inmediato.

Limitaciones de la investigación

A pesar de que esta investigación ha tratado de abordar de forma exhaustiva algunos condicionantes del medio ambiente, presenta algunas limitaciones que pueden servir como punto de partida para nuevas investigaciones. En primer lugar, la investigación se ha centrado en evaluar el efecto directo de las energías renovables sobre las emisiones de CO₂. En este sentido, posibles investigaciones pueden evaluar los efectos indirectos mediante diversos canales, tales como la eficiencia energética, el desarrollo tecnológico o las finanzas verdes. En segundo lugar, la investigación ha omitido

variables que pueden incidir en la intensidad de las emisiones de CO₂. Ante esto, cabe la posibilidad de evaluar efectos directos e indirectos de otras variables económicas, sociales y políticas, tales como índices de globalización, el capital humano o la calidad institucional. Además, al no encontrar evidencia concluyente sobre la relación entre la densidad de la población urbana sobre las emisiones de CO₂, se puede profundizar estudios que abarquen otras dimensiones poblacionales, tanto en áreas urbanas como rurales.

Por otro lado, la evidencia de heterogeneidad del panel puede ser abordada con muestras en sub-paneles, donde se contemplen estructuras más similares y que permitan profundizar el alcance de las diferentes variables sobre el medioambiente. Finalmente, este estudio evaluó los efectos de corto y largo plazo. Sin embargo, las relaciones entre las variables de estudio son complejas, por lo que cabe la posibilidad de utilizar técnicas econométricas alternativas, tales como modelos de Vectores Autorregresivos y de Medias Móviles, que permiten verificar interacciones dinámicas a lo largo del tiempo.

6. REFERENCIAS

- Acheampong, A. O., Adams, S., & Boateng, E. (2019). Do globalization and renewable energy contribute to carbon emissions mitigation in Sub-Saharan Africa? *Science of The Total Environment*, 677, 436-446. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.353>
- Acheampong, A. O., Boateng, E., & Amponsah, M. (2022). Econometric analysis of the economic growth-energy consumption nexus in emerging economies: the role of globalization. En M. Shahbaz, A. K. Tiwari, & A. Sinha (Edits.), *Energy-Growth Nexus in an Era of Globalization* (págs. 105-148).

- ELSEVIER.
doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824440-1.00011-4>
- Adebayo, T. S., & Samour, A. (2024). Renewable energy, fiscal policy and load capacity factor in BRICS countries: novel findings from panel nonlinear ARDL model. *Environment, Development and Sustainability*, 26, 4365–4389. doi:<https://doi.org/10.1007/s10668-022-02888-1>
- Adekoya, O. B., Oliyide, J. A., & Fasanya, I. O. (2022). Renewable and non-renewable energy consumption – Ecological footprint nexus in net-oil exporting and net-oil importing countries: Policy implications for a sustainable environment. *Renewable Energy*, 189, 524-534. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.036>
- Agboola, M. O., Bekun, F. V., & Joshua, U. (2021). Pathway to environmental sustainability: Nexus between economic growth, energy consumption, CO2 emission, oil rent and total natural resources rent in Saudi Arabia. *Resources Policy*, 74, 102380. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102380>
- Ahmad, M., Dai, J., Mehmood, U., & Houran, M. A. (2023). Renewable energy transition, resource richness, economic growth, and environmental quality: Assessing the role of financial globalization. *Renewable Energy*, 216, 119000. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119000>
- Alam, M. B., & Hossain, M. S. (2024). Investigating the connections between China's economic growth, use of renewable energy, and research and development concerning CO2 emissions: An ARDL Bound Test Approach. *Technological Forecasting and Social Change*, 201, 123220. doi:<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123220>
- Alam, M. S., Duraisamy, P., Siddik, A. B., Murshed, M., Mahmood, H., Palanisamy, M., & Kirikkaleli, D. (2023). The impacts of globalization, renewable energy, and agriculture on CO2 emissions in India: Contextual evidence using a novel composite carbon emission-related atmospheric quality index. *Gondwana Research*, 119, 384-401. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.04.005>
- Amer, E. A., Meyad, E. M., Meyad, A. M., & Mohsin, A. (2024). Impacts of renewable and disaggregated non-renewable energy consumption on CO2 emissions in GCC countries: A STIRPAT model analysis. *Heliyon*, 10(9), e30154. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30154>
- Amin, N., Shabbir, M. S., & Abbass, K. (2024). Renewable energy consumption and its impact on environmental quality: A pathway for achieving sustainable development goals in ASEAN countries. *Energy & Environment*, 35(2), 644-662. doi:<https://doi.org/10.1177/0958305X221134113>
- Apergis, N., Jebli, M. B., & Youssef, S. B. (2018). Does renewable energy consumption and health expenditures decrease carbon dioxide emissions? Evidence for sub-Saharan Africa countries. *Renewable Energy*, 127, 1011-1016. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.043>
- Aquilas, N. A., Ngangnchi, F. H., & Mbella, M. E. (2024). Industrialization and environmental sustainability in Africa: The moderating effects of renewable and non-renewable energy consumption. *Heliyon*, 10, e25681. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25681>
- Aydin, C., & Esen, Ö. (2018). Reducing CO2 emissions in the EU member

- states: Do environmental taxes work? *Journal of Environmental Planning and Management*, 16(13), 2396-2420. doi:https://doi.org/10.1080/09640568.2017.1395731
- Balsalobre-Lorente, D., Parente, C. C., Leitão, N. C., & Cantos-Cantos, J. M. (2023). The influence of economic complexity processes and renewable energy on CO2 emissions of BRICS. What about industry 4.0? *Resources Policy*, 82, 103547. doi:https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103547
- Bekun, F. V., Gyamfi, B. A., Onifade, S. T., & 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, 127924. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127924
- Bello, M. O., Solarin, S. A., & Yen, Y. Y. (2018). The impact of electricity consumption on CO2 emission, carbon footprint, water footprint and ecological footprint: The role of hydropower in an emerging economy. *Journal of Environmental Management*, 219, 218-230. doi:https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.101
- Bergougui, B. (2024). Moving toward environmental mitigation in Algeria: Asymmetric impact of fossil fuel energy, renewable energy and technological innovation on CO2 emissions. *Energy Strategy Reviews*, 51, 101281. doi:https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101281
- Bilgili, F., Lorente, D. B., Kuşkaya, S., Ünlü, F., Gençoğlu, P., & Rosha, P. (2021). The role of hydropower energy in the level of CO2 emissions: An application of continuous wavelet transform. *Renewable Energy*, 178, 283-294. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.015
- Bowden, N., & Payne, J. E. (2009). The causal relationship between U.S. energy consumption and real output: A disaggregated analysis. *Journal of Policy Modeling*, 31(2), 180-188. doi:https://doi.org/10.1016/j.jpplmod.2008.09.001
- Box, G. E., & Cox, D. R. (1964). An Analysis of Transformations. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 26(2), 211-243. doi: https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1964.tb00553.x
- Bretschger, L. (2020). Malthus in the light of climate change. *European Economic Review*, 127, 103477. doi:https://doi.org/10.1016/j.eurocorev.2020.103477
- Briera, T., & Lefèvre, J. (2024). Reducing the cost of capital through international climate finance to accelerate the renewable energy transition in developing countries. *Energy Policy*, 188, 114104. doi:https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114104
- Brock, W. A., & Taylor, M. S. (2005). Chapter 28 - Economic Growth and the Environment: A Review of Theory and Empirics. En P. Aghion, & S. N. Durlauf (Edits.), *Handbook of Economic Growth* (págs. 1749-1821). ELSEVIER. doi:https://doi.org/10.1016/S1574-0684(05)01028-2
- Çaglar, A. E., Daştan, M., & Rej, S. (2024). A new look at China's environmental quality: how does environmental sustainability respond to the asymmetrical behavior of the competitive industrial sector? *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 31(1), 16-28. doi:https://doi.org/10.1080/13504509.2023.2248584

- Chen, C., Qin, Y., & Gao, Y. (2023). Does new urbanization affect CO2 emissions in China: A spatial econometric analysis. *Sustainable Cities and Society*, 96, 104687. doi:https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104687
- Chen, J., Wang, B., Huang, S., & Song, M. (2020). The influence of increased population density in China on air pollution. *Science of The Total Environment*, 735, 139456. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139456
- Chen, Y., Wang, Z., & Zhong, Z. (2019). CO2 emissions, economic growth, renewable and non-renewable energy production and foreign trade in China. *Renewable Energy*, 131, 208-216. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.047
- Chudik, A., & Pesaran, M. H. (2015). Common correlated effects estimation of heterogeneous dynamic panel data models with weakly exogenous regressors. *Journal of Econometrics*, 188(2), 393-420. doi:https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2015.03.007
- Copeland, B. R., & Taylor, M. S. (2004). Trade, Growth, and the Environment. *Journal of Economic Literature*, 42(1), 7-71. doi:DOI: 10.1257/002205104773558047
- Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M., E., S., . . . Branco, A. (2023). *GHG emissions of all world countries*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi:doi:10.2760/953332,
- Cropper, M., & Griffiths, C. (1994). The Interaction of Population Growth and Environmental Quality. *The American Economic Review*, 84(2), 250-254. doi:https://www.jstor.org/stable/217838
- Dasgupta, S., Lall, S., & Wheeler, D. (2023). Subways and CO2 emissions: A global analysis with satellite data. *Science of The Total Environment*, 883, 163691. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163691
- Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey. *Ecological Economics*, 49(4), 431-455. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.02.011
- Eberhardt, M., & Bond, S. (2009). Cross-section dependence in nonstationary panel models: a novel estimator. *MPRA Paper 17692, University Library of Munich, Germany*. Recuperado el 2 de May de 2024, de https://mpra.ub.uni-muenchen.de/17692/1/MPRA_paper_17692.pdf
- Elom, C. O., Onyeneke, R. U., Ankrah, D. A., Deffor, E. W., Ayerakwa, H. M., & Uwaleke, C. C. (2024). Achieving carbon neutrality in Africa is possible: the impact of education, employment, and renewable energy consumption on carbon emissions. *Carbon Research*, 3, 24. doi:https://doi.org/10.1007/s44246-024-00102-7
- 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*, 263, 125660. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125660
- Fang, X., & Gao, S. (2023). An empirical study on relationship between island ecological environment and socio-economic development from perspective of environmental Kuznets curve (EKC). *Ocean & Coastal Management*, 244, 106819. doi:https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106819
- Fu, Q., Álvarez-Otero, S., Sial, M. S., Comite, U., Zheng, P., Samad, S.,

- & Oláh, J. (2021). Impact of Renewable Energy on Economic Growth and CO2 Emissions—Evidence from BRICS Countries. *Processes*, 9(8), 1281. doi:<https://doi.org/10.3390/pr9081281>
- Gieraltowska, U., Asyngier, R., Nakonieczny, J., & Salahodjaev, R. (2022). Renewable Energy, Urbanization, and CO2 Emissions: A Global Test. *Energies*, 15(9), 3390. doi:<https://doi.org/10.3390/en15093390>
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement. *NEER Working Paper #3914*, 1-57. doi:<https://doi.org/10.3386/w3914>
- Güney, T. (2022). Solar energy, governance and CO2 emissions. *Renewable Energy*, 184, 791-798. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.11.124>
- Güney, T., & Üstündağ, E. (2022). Wind energy and CO2 emissions: AMG estimations for selected countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 21303–21313. doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-021-17382-w>
- Hannah Ritchie. (2023). *Global inequalities in CO2 emissions*. (OurWorldInData.org, Editor) Recuperado el 29 de enero de 2024, de <https://ourworldindata.org/inequality-co2>
- Hashmi, R., & Alam, K. (2019). Dynamic relationship among environmental regulation, innovation, CO2 emissions, population, and economic growth in OECD countries: A panel investigation. *Journal of Cleaner Production*, 231, 1100-1109. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.325>
- Hoa, P. X., Xuan, V. N., & Thu, N. T. (2023). Nexus of innovation, renewable consumption, FDI, growth and CO2 emissions: The case of Vietnam. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 9(3), 100100. doi:<https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2023.100100>
- Huang, Y., Haseeb, M., Usman, M., & Ozturk, I. (2022). Dynamic association between ICT, renewable energy, economic complexity and ecological footprint: Is there any difference between E-7 (developing) and G-7 (developed) countries? *Technology in Society*, 68, 101853. doi:<https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101853>
- Huo, C., Hameed, J., Sharif, A., Albasher, G., Alamri, O., Alsultan, N., & Baig, N. u.-a. (2022). Recent scenario and nexus of globalization to CO2 emissions: Evidence from wavelet and Quantile on Quantile Regression approach. *Environmental Research*, 212(Part A), 113067. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113067>
- Hwang, Y. K., & Díez, Á. S. (2024). Renewable energy transition and green growth nexus in Latin America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 198, 114431. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114431>
- IEA. (2024). *CO2 Emissions in 2023. A new record high, but is there light at the end of the tunnel?* París: IEA. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>
- Im, K. S., Pesaran, M., & Shin, Y. (2003). Testing for unit roots in heterogeneous panels. *Journal of Econometrics*, 115(1), 53-74. doi:[https://doi.org/10.1016/S0304-4076\(03\)00092-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4076(03)00092-7)
- İnal, V., Addi, H. M., Çakmak, E. E., Torusdağ, M., & Çalışkan, M. (2022). The nexus between

- renewable energy, CO2 emissions, and economic growth: Empirical evidence from African oil-producing countries. *Energy Reports*, 8, 1634-1643. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.12.051>
- Işık, C., Bulut, U., Ongan, S., Islam, H., & Irfan, M. (2024). Exploring how economic growth, renewable energy, internet usage, and mineral rents influence CO2 emissions: A panel quantile regression analysis for 27 OECD countries. *Resources Policy*, 92, 105025. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105025>
- Islama, M. M., Alam, M. M., Ahmed, F., & Al-Amin, A. Q. (2023). Economic growth and environmental pollution nexus in Bangladesh: revisiting the environmental Kuznets curve hypothesis. *International Journal of Environmental Studies*, 80(1), 68–92. doi:<https://doi.org/10.1080/00207233.2021.2017169>
- Jebli, M. B., Farhani, S., & Guesmi, K. (2020). Renewable energy, CO2 emissions and value added: Empirical evidence from countries with different income levels. *Structural Change and Economic Dynamics*, 53, 402-410. doi:<https://doi.org/10.1016/j.strueco.2019.12.009>
- Kanlı, N. K., & Küçükefe, B. (2023). Is the environmental Kuznets curve hypothesis valid? A global analysis for carbon dioxide emissions. *Environment, Development and Sustainability*, 25, 2339–2367. doi:<https://doi.org/10.1007/s10668-022-02138-4>
- Kao, C., & Chiang, M.-H. (2001). On the estimation and inference of a cointegrated regression in panel data. En B. Baltagi, T. Fomby, & R. Carter Hill (Edits.), *Nonstationary Panels, Panel Cointegration, and Dynamic Panels (Advances in Econometrics, Vol. 15)* (págs. 179-222). Leeds: Emerald Group Publishing Limited. doi:[https://doi.org/10.1016/S0731-9053\(00\)15007-8](https://doi.org/10.1016/S0731-9053(00)15007-8)
- Kassouri, Y., & Alola, A. A. (2023). Examining the interaction of technology adoption-diffusion and sectoral emission intensity in developing and emerging countries. *Journal of Cleaner Production*, 405, 136920. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136920>
- Khan, H., Weili, L., & Khan, I. (2022a). Examining the effect of information and communication technology, innovations, and renewable energy consumption on CO2 emission: evidence from BRICS countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 47696–47712. doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-022-19283-y>
- Khan, H., Weili, L., & Khan, I. (2022b). Environmental innovation, trade openness and quality institutions: an integrated investigation about environmental sustainability. *Environment, Development and Sustainability*, 24, 3832–3862. doi:<https://doi.org/10.1007/s10668-021-01590-y>
- Khan, Z., Ali, S., Umar, M., Kirikkaleli, D., & Jiao, Z. (2020). Consumption-based carbon emissions and International trade in G7 countries: The role of Environmental innovation and Renewable energy. *Science of The Total Environment*, 730, 138945. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138945>
- Kim, D., & Park, Y.-J. (2022). Nonlinear causality between energy consumption and economic growth by timescale. *Energy Strategy Reviews*, 44, 100949. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100949>
- Koengkan, M., & Fuinhas, J. A. (2020). Exploring the effect of the

- renewable energy transition on CO2 emissions of Latin American & Caribbean countries. *International Journal of Sustainable Energy*, 39(6), 515-538.
doi:<https://doi.org/10.1080/14786451.2020.1731511>
- Kruse-Andersen, P. K. (2023). Directed technical change, environmental sustainability, and population growth. *Journal of Environmental Economics and Management*, 122, 102885.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jeem.2023.102885>
- Kwakwa, P. A. (2023). Sectoral growth and carbon dioxide emission in Africa: can renewable energy mitigate the effect? *Research in Globalization*, 6, 100130.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.resglo.2023.100130>
- Kwakwa, P. A. (2023a). Climate change mitigation role of renewable energy consumption: Does institutional quality matter in the case of reducing Africa's carbon dioxide emissions? *Journal of Environmental Management*, 342, 118234.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118234>
- Latief, R., Sattar, U., Javeed, S. A., Gull, A. A., & Pei, Y. (2022). The Environmental Effects of Urbanization, Education, and Green Innovation in the Union for Mediterranean Countries: Evidence from Quantile Regression Model. *Energies*, 15, 5456.
doi:<https://doi.org/10.3390/en15155456>
- Leal, P. H., & Marques, A. C. (2022). The evolution of the environmental Kuznets curve hypothesis assessment: A literature review under a critical analysis perspective. *Heliyon*, 8(11), e11521.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11521>
- Lee, H., & Ryu, J.-C. (1991). Energy and CO2 emissions in Korea: Long-term scenarios and related policies. *Energy Policy*, 19(10), 926-933.
doi:[https://doi.org/10.1016/0301-4215\(91\)90111-Z](https://doi.org/10.1016/0301-4215(91)90111-Z)
- Li, B., & Haneklaus, N. (2021). The role of renewable energy, fossil fuel consumption, urbanization and economic growth on CO2 emissions in China. *Energy Reports*, 7(7), 783-791.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.09.194>
- Li, B., & Haneklaus, N. (2022). Reducing CO2 emissions in G7 countries: The role of clean energy consumption, trade openness and urbanization. *Energy Reports*, 8(4), 704-713.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.238>
- Li, M., Ahmad, M., Fareed, Z., Hassan, T., & Kirikkaleli, D. (2021). Role of trade openness, export diversification, and renewable electricity output in realizing carbon neutrality dream of China. *Journal of Environmental Management*, 297, 113419.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113419>
- Liao, W., Liu, D., Xue, Y., Wu, Y., Xue, F., & Chang, K. (2024). Power generation expansion planning considering natural disaster scenarios under carbon emission trajectory constraints. *Applied Energy*, 361, 122832.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122832>
- Lin, B., & Okoye, J. O. (2023). Towards renewable energy generation and low greenhouse gas emission in high-income countries: Performance of financial development and governance. *Renewable Energy*, 215, 118931.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.118931>
- Liu, X., Wahab, S., Hussain, M., Sun, Y., & Kirikkaleli, D. (2021). China

- carbon neutrality target: Revisiting FDI-trade-innovation nexus with carbon emissions. *Journal of Environmental Management*, 294, 113043.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113043>
- Lu, J., Bin Li, H. L., & Al-Barakani, A. (2021). Expansion of city scale, traffic modes, traffic congestion, and air pollution. *Cities*, 108, 102974.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102974>
- Lysen, E. H. (1989). The Potential of Renewable Energy to Reduce CO2 Emissions. En P. Okken, R. Swart, & S. Zwerver (Edits.), *Climate and Energy: The Feasibility of Controlling CO2 Emissions* (págs. 78–94). Dordrecht: Springer.
doi:https://doi.org/10.1007/978-94-009-0485-9_6
- Maja, M. M., & Ayano, S. F. (2021). The Impact of Population Growth on Natural Resources and Farmers' Capacity to Adapt to Climate Change in Low-Income Countries. *Earth Systems and Environment*, 5, 271–283.
doi:<https://doi.org/10.1007/s41748-021-00209-6>
- Mendonça, A. K., Barni, G. d., Moro, M. F., Borna, A. C., Kupek, E., & Fernandes, L. (2020). Hierarchical modeling of the 50 largest economies to verify the impact of GDP, population and renewable energy generation in CO2 emissions. *Sustainable Production and Consumption*, 22, 58-67.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.02.001>
- Mohammed, S., Gill, A. R., Ghosal, K., Al-Dalahmeh, 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*, 18, 100312.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ese.2023.100312>
- Mohsin, M., Orynbassarov, D., Anser, M. K., & Oskenbayev, Y. (2023). Does hydropower energy help to reduce CO2 emissions in European Union countries? evidence from quantile estimation. *Environmental Development*, 45, 100794.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.envdev.2022.100794>
- Musah, M., Kong, Y., Mensah, I. A., Antwi, S. K., & Donkor, M. (2021). The connection between urbanization and carbon emissions: a panel evidence from West Africa. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 11525–11552.
doi:<https://doi.org/10.1007/s10668-020-01124-y>
- Nahrin, R., Rahman, M. H., Majumder, S. C., & Esquivias, M. A. (2023). Economic Growth and Pollution Nexus in Mexico, Colombia, and Venezuela (G-3 Countries): The Role of Renewable Energy in Carbon Dioxide Emissions. *Energies*, 16(3), 1076.
doi:<https://doi.org/10.3390/en16031076>
- Namahoro, J., Wu, Q., Zhou, N., & Xue, S. (2022). Impact of energy intensity, renewable energy, and economic growth on CO2 emissions: Evidence from Africa across regions and income levels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 147, 111233.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111233>
- Nassar, Y. F., El-Khozondar, H. J., Elnaggar, M., El-batta, F. F., El-Khozondar, R. J., & Alsadi, S. Y. (2024). Renewable energy potential in the State of Palestine: Proposals for sustainability. *Renewable Energy Focus*, 49, 100576.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100576>
- Nepal, R., Liu, Y., Wang, J., & Dong, K. (2024). How does green finance

- promote renewable energy technology innovation? A quasi-natural experiment perspective. *Energy Economics*, 134, 107576. doi:https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107576
- Novotny, V. (1999). Diffuse pollution from agriculture — A worldwide outlook. *Water Science and Technology*, 39(3), 1-13. doi:https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00027-X
- Ojaghlou, M., Ugurlu, E., Kadłubek, M., & Thalassinou, E. (2023). Economic Activities and Management Issues for the Environment: An Environmental Kuznets Curve (EKC) and STIRPAT Analysis in Turkey. *Resources*, 12(5), 57. doi:https://doi.org/10.3390/resources12050057
- Olabi, A., Elsaid, K., Obaideen, K., Abdelkareem, M. A., Rezk, H., Wilberforce, T., . . . 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, 100498. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100498
- Pata, U. K. (2021). Linking renewable energy, globalization, agriculture, CO2 emissions and ecological footprint in BRIC countries: A sustainability perspective. *Renewable Energy*, 173, 197-208. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.125
- Pedroni, P. (2001). Fully modified OLS for heterogeneous cointegrated panels. En B. Baltagi, T. Fomby, & R. Carter Hill (Edits.), *Nonstationary Panels, Panel Cointegration, and Dynamic Panels (Advances in Econometrics, Vol. 15)* (págs. 93-130). Leeds: Emerald Group Publishing Limited. doi:https://doi.org/10.1016/S0731-9053(00)15004-2
- Perone, G. (2024). The relationship between renewable energy production and CO2 emissions in 27 OECD countries: A panel cointegration and Granger non-causality approach. *Journal of Cleaner Production*, 434, 139655. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139655
- Pesaran, M. H. (2007). A simple panel unit root test in the presence of cross-section dependence. *Journal of Applied Econometrics*, 22(2), 265-312. doi:https://doi.org/10.1002/jae.951
- Pesaran, M. H. (2021). General diagnostic tests for cross-sectional dependence in panels. *Empirical Economics*, 60, 13-50. doi:https://doi.org/10.1007/s00181-020-01875-7
- Pesaran, M. H., & Yamagata, T. (2008). Testing slope homogeneity in large panels. *Journal of Econometrics*, 142(1), 50-93. doi:https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2007.05.010
- Phadkantha, R., & Tansuchat, R. (2023). Dynamic impacts of energy efficiency, economic growth, and renewable energy consumption on carbon emissions: Evidence from Markov Switching model. *Energy Reports*, 9(12), 332-336. doi:https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.10.013
- Pickson, R. B., Gui, P., Jian, L., & Boateng, E. (2024). Do population-related factors matter for carbon emissions? Lessons from different income groups of countries. *Urban Climate*, 55, 101934. doi:https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101934
- Pradhan, R. P., Nair, M. S., Hall, J. H., & Bennett, S. E. (2024). Planetary health issues in the developing world: Dynamics between transportation systems, sustainable economic development, and CO2 emissions.

- Journal of Cleaner Production*, 449, 140842. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140842>
- Ragoubi, H., & Mighri, Z. (2021). Spillover effects of trade openness on CO2 emissions in middle-income countries: A spatial panel data approach. *Regional Science Policy & Practice*, 13(3), 835-878. doi:<https://doi.org/10.1111/rsp3.12360>
- Rahman, M. M., & Alam, K. (2021). Clean energy, population density, urbanization and environmental pollution nexus: Evidence from Bangladesh. *Renewable Energy*, 172, 1063-1072. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.103>
- Rahman, M. M., & Alam, K. (2022a). Effects of corruption, technological innovation, globalisation, and renewable energy on carbon emissions in Asian countries. *Utilities Policy*, 79, 101448. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jup.2022.101448>
- Rahman, M. M., & Alam, K. (2022c). Impact of industrialization and non-renewable energy on environmental pollution in Australia: Do renewable energy and financial development play a mitigating role? *Renewable Energy*, 195, 203-213. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.012>
- Rahman, M. M., Alam, K., & Velayutham, E. (2022b). Reduction of CO2 emissions: The role of renewable energy, technological innovation and export quality. *Energy Reports*, 8, 2793-2805. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2022.01.200>
- Rahman, M. M., Khan, Z., Khan, S., & Tariq, M. (2023). How is energy intensity affected by industrialisation, trade openness and financial development? A dynamic analysis for the panel of newly industrialized countries. *Energy Strategy Reviews*, 49, 101182. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101182>
- Raihan, A. (2023). The influences of renewable energy, globalization, technological innovations, and forests on emission reduction in Colombia. *Innovation and Green Development*, 2(4), 100071. doi:<https://doi.org/10.1016/j.igd.2023.100071>
- Raihan, A., & Tuspekova, A. (2022). The nexus between economic growth, renewable energy use, agricultural land expansion, and carbon emissions: New insights from Peru. *Energy Nexus*, 6, 100067. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100067>
- Rakpho, P., Chitksame, T., & Kaewsompong, N. (2023). The effect of environmental taxes and economic growth on carbon emission in G7 countries applying panel kink regression. *Energy Reports*, 9(10), 1384-1391. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2023.05.185>
- Ridwan, M., Urbee, A. J., Voumik, L. C., Das, M. K., Rashid, M., & Esquivias, M. A. (2024). Investigating the environmental Kuznets curve hypothesis with urbanization, industrialization, and service sector for six South Asian Countries: Fresh evidence from Driscoll Kraay standard error. *Research in Globalization*, 100223. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resglo.2024.100223>
- Ridzuan, N. H., Marwan, N. F., Khalid, N., Ali, M. H., & Tseng, M.-L. (2020). Effects of agriculture, renewable energy, and economic growth on carbon dioxide emissions: Evidence of the environmental Kuznets curve. *Resources, Conservation and Recycling*, 160, 104879. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104879>

- Semet, R. (2024). Coordinating social equity and emissions: Challenges in carbon tax policy. *Energy Policy*, 185, 113954. doi:https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113954
- Shabani, Z. D. (2024). Renewable energy and CO2 emissions: Does human capital matter? *Energy Reports*, 11, 3474-3491. doi:https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.03.021
- Shahzad, K., Abdul, D., Umar, M., Safi, A., Maqsood, S., Baseer, A., & Lu, B. (2023). Analysis of obstacles to adoption of solar energy in emerging economies using spherical fuzzy AHP decision support system: A case of Pakistan. *Energy Reports*, 10, 381-395. doi:https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.06.015
- Shao, J., & Wang, L. (2023). Can new-type urbanization improve the green total factor energy efficiency? Evidence from China. *Energy*, 262, 125499. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125499
- Silva, N., Fuinhas, J. A., & Koengkan, M. (2021). Assessing the advancement of new renewable energy sources in Latin American and Caribbean countries. *Energy*, 237, 121611. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121611
- Simon, J. L. (1996). *The Ultimate Resource 2*. Princeton: Princeton University Press. doi:https://doi.org/10.1515/9780691214764
- Song, A., Rasool, Z., Nazar, R., & Anser, M. K. (2024). Towards a greener future: How green technology innovation and energy efficiency are transforming sustainability. *Energy*, 290, 129891. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129891
- Stern, D. I. (1993). Energy and economic growth in the USA: A multivariate approach. *Energy Economics*, 15(2), 137-150. doi:https://doi.org/10.1016/0140-9883(93)90033-N
- Stern, D. I. (2004). Environmental Kuznets Curve. *Encyclopedia of Energy*, 517-525. doi:https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00454-X
- Tchouto, J.-E. T. (2023). An empirical assessment on the leveraging evidence of economic complexity under environmental kuznets curve hypothesis: A comparative analysis between Nordic and Non-Nordic European countries. *Innovation and Green Development*, 2(4), 100074. doi:https://doi.org/10.1016/j.igd.2023.100074
- 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*, 34(6), 1942-1950. doi:https://doi.org/10.1016/j.eneco.2012.08.021
- Uddin, I., Ahmad, M., D. I., Balbaa, M. E., Akhmedov, A., Khasanov, S., & Haq, M. U. (2023). Enhancing institutional quality to boost economic development in developing nations: New insights from CS-ARDL approach. *Research in Globalization*, 7, 100137. doi:https://doi.org/10.1016/j.resglo.2023.100137
- Ulucak, R., Danish, & Kassouri, Y. (2020). An assessment of the environmental sustainability corridor: Investigating the non-linear effects of environmental taxation on CO2 emissions. *Sustainable Development*, 28(4), 1010-1018. doi:https://doi.org/10.1002/sd.2057
- Wang, Q., & Li, L. (2021). The effects of population aging, life expectancy, unemployment rate, population

- density, per capita GDP, urbanization on per capita carbon emissions. *Sustainable Production and Consumption*, 28, 760-774. doi:https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.06.029
- Wang, Q., Hubacek, K., Feng, K., Wei, Y.-M., & Liang, Q.-M. (2016). Distributional effects of carbon taxation. *Applied Energy*, 184, 1123-1131. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.083
- Wang, Q., Sun, Z., Guo, J., & Li, R. (2023a). The more effective option to combat environmental degradation: Energy efficiency vs. renewable energy vs. natural gas? *Energy*, 128512. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.114575
- Wang, Q., Yang, T., & Li, R. (2023b). Does income inequality reshape the environmental Kuznets curve (EKC) hypothesis? A nonlinear panel data analysis. *Environmental Research*, 216, 114575. doi:https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114575
- Wang, S., Zafar, M. W., Vasbieva, D. G., & Yurtkuran, S. (2024). Economic growth, nuclear energy, renewable energy, and environmental quality: Investigating the environmental Kuznets curve and load capacity curve hypothesis. *Gondwana Research*, 129, 490-504. doi:https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.06.009
- Wang, W.-Z., Liu, L.-C., Liao, H., & Wei, Y.-M. (2021). Impacts of urbanization on carbon emissions: An empirical analysis from OECD countries. *Energy Policy*, 151, 112171. doi:https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112171
- Wencong, L., Kasimov, I., & Saydaliev, H. B. (2023). Foreign direct investment and renewable energy: Examining the environmental Kuznets curve in resource-rich transition economies. *Renewable Energy*, 208, 301-310. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.054
- Wenlong, Z., Tien, N. H., Sibghatullah, A., Asih, D., Soelton, M., & Ramli, Y. (2023). Impact of energy efficiency, technology innovation, institutional quality, and trade openness on greenhouse gas emissions in ten Asian economies. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 43024-43039. doi:https://doi.org/10.1007/s11356-022-20079-3
- Wisniewski, G., Rogulska, M., Grzybek, A., & Pietruszko, S. M. (1995). The role of renewable energy in carbon dioxide emission reduction in Poland. *Applied Energy*, 52(2), 291-298. doi:https://doi.org/10.1016/0306-2619(95)00045-T
- Wolde-Rufael, Y., & Mulat-Weldemeskel, E. (2021). Do environmental taxes and environmental stringency policies reduce CO2 emissions? Evidence from 7 emerging economies. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 22392-22408. doi:https://doi.org/10.1007/s11356-020-11475-8
- Wolde-Rufael, Y., & Mulat-Weldemeskel, E. (2022). The moderating role of environmental tax and renewable energy in CO2 emissions in Latin America and Caribbean countries: Evidence from method of moments quantile regression. *Environmental Challenges*, 6, 100412. doi:https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100412
- Wolde-Rufael, Y., & Mulat-Weldemeskel, E. (2023). Effectiveness of environmental taxes and environmental stringent policies on CO2 emissions: the European experience. *Environment, Development and Sustainability*, 25, 5211-5239. doi:https://doi.org/10.1007/s10668-022-02262-1

- Yadav, A., Gyamfi, B. A., Asongu, S. A., & Behera, D. K. (2024). The role of green finance and governance effectiveness in the impact of renewable energy investment on CO2 emissions in BRICS economies. *Journal of Environmental Management*, 358, 120906. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120906>
- Yang, S., & Umar, M. (2022). How globalization is reshaping the environmental quality in G7 economies in the presence of renewable energy initiatives? *Renewable Energy*, 193, 128-135. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.006>
- York, R., Rosa, E. A., & Dietz, T. (2003). STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological Economics*, 46(3), 351-365. doi:[https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(03\)00188-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(03)00188-5)
- Yu, J., Tang, Y. M., Chau, K. Y., Nazar, R., Ali, S., & Iqbal, W. (2022). Role of solar-based renewable energy in mitigating CO2 emissions: Evidence from quantile-on-quantile estimation. *Renewable Energy*, 182, 216-226. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.002>
- Yuping, L., Ramzan, M., Xincheng, L., Murshed, M., Awosusi, A. A., BAH, S. I., & Adebayo, T. S. (2021). Determinants of carbon emissions in Argentina: The roles of renewable energy consumption and globalization. *Energy Reports*, 7, 4747-4760. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.07.065>
- Zaidi, S., Danish, Hou, F., & Mirza, F. (2018). The role of renewable and non-renewable energy consumption in CO2 emissions: a disaggregate analysis of Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 31616–31629. doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-018-3059-y>
- Zhang, J., Alharthi, M., Abbas, Q., Li, W., Mohsin, M., Jamal, K., & Taghizadeh-Hesary, F. (2020). Reassessing the Environmental Kuznets Curve in Relation to Energy Efficiency and Economic Growth. *Sustainability*, 12(20), 8346. doi:<https://doi.org/10.3390/su12208346>
- Zhang, S., Kaikun, W., Yastrubskiy, M., & Huang, C. (2023b). Carbon emissions from international trade and consumption: Assessing the role of cumulative risk for EU and Chinese economic development. *Energy Strategy Reviews*, 50, 101219. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101219>
- Zhang, T., Yin, J., Li, Z., Jin, Y., Ali, A., & Jiang, B. (2023a). A dynamic relationship between renewable energy consumption, non-renewable energy consumption, economic growth and CO2 emissions: Evidence from Asian emerging economies. *Frontiers in Environmental Science*, 1-17. doi:<https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1092196>
- Zhang, Z., Bashir, T., Song, J., Aziz, S., Yahya, G., Bashir, S., & Zamir, A. (2022). The effects of Environmental Kuznets Curve toward environmental pollution, energy consumption on sustainable economic growth through moderate role of technological innovation. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 405–416. doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-021-16956-y>
- Zhou, X., Xie, F., Li, H., Zheng, C., & Zhao, X. (2023). Understanding inter-term fossil energy consumption pathways in China based on sustainable development goals. *Geoscience*

7. ANEXOS

Apéndice A.1

Tabla 14. Países de alto ingreso utilizados en la investigación

| | | |
|------------|---------------|--------------------|
| Australia* | Islandia | Polonia* |
| Austria* | Irlanda* | Portugal |
| Bélgica* | Israel* | Rumania |
| Canadá* | Italia | República Eslovaca |
| Croacia | Japón* | Eslovenia |
| Dinamarca* | Corea, Rep.* | España |
| Estonia* | Lituania | Suecia |
| Francia | Luxemburgo* | Suiza |
| Alemania* | Países Bajos* | Reino Unido |
| Hungría | Nueva Zelanda | Estados Unidos* |

Nota. *Sub-panel de países de mayor emisión de CO2 promedio