

EL ROL DE LAS TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS EN EL
DESACOPLE ENTRE CONTAMINACIÓN Y CRECIMIENTO
EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE.

Nueva evidencia para un período extenso (1970-2021)

Sebastián Kruk Gencarelli

Programa de Maestría en Economía de la Facultad de Ciencias
Económicas, Universidad de la República.

Montevideo - Uruguay

Agosto de 2023

EL ROL DE LAS TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS EN EL
DESACOPLE ENTRE CONTAMINACIÓN Y CRECIMIENTO
EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE.

Nueva evidencia para un período extenso (1970-2021)

Sebastián Kruk Gencarelli

Tesis de Maestría presentada al Programa de Maestría en Economía de la Facultad de Ciencias Económicas, Universidad de la República, como parte de los requisitos para la obtención del título de Magíster en Economía.

Director de tesis:

Profesora Titular Dra. Bibiana Lanzilotta

Codirector de tesis:

Mag. Paula Cobas

Director académico:

Profesora Titular Dra. Bibiana Lanzilotta

Montevideo – Uruguay

Agosto de 2023

INTEGRANTES DEL TRIBUNAL DE DEFENSA DE TESIS

Ejemplo: Profesor Titular Dr. Nombre Apellido

Ejemplo: Profesor Titular Dr. Nombre Apellido

Ejemplo: Profesor Titular Dr. Nombre Apellido

Montevideo - Uruguay

Agosto de 2023

*Dedico este trabajo de investigación a mi esposa Alicia Álvarez y a mi antiguo profesor Enrique
Gagliardi.*

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi querida esposa Alicia y a mis hijos Francisco y Sofía por haberme acompañado en este arduo y largo trabajo de investigación.

En segundo lugar, a mis tutoras Bibiana y Paula por el apoyo y paciencia brindado en estos años de estudio.

“En la naturaleza nada ocurre en forma aislada. Cada fenómeno afecta a otro y es, a su vez, influenciado por éste; y es generalmente el olvido de este movimiento y de esta interacción universal lo que impide a nuestros naturalistas percibir con claridad las cosas más simples”

Friedrich Engels

Resumen

El presente estudio tiene la finalidad de analizar el impacto que tienen la energía renovable y la intensidad energética en la relación entre el producto y las emisiones de CO₂, en los países de América Latina y el Caribe. Se apoya en la estimación de funciones de producción inspiradas en dos teorías alternativas (STIRPAT y otra de inspiración neoclásica) que convergen en un mismo modelo de análisis una vez linealizados. Se utilizan datos provenientes del Banco Mundial y la CELADE para la construcción de un panel de países entre los años 1970 y 2021, aplicándose métodos econométricos de Mínimos Cuadrados Ordinarios Agrupados y Efectos Fijos. Se verifica que hay una relación directa entre la variación de las emisiones, del producto, de la intensidad energética e inversa con las energías renovables. En los países latinoamericanos y del Caribe, a diferencia de los europeos, no es la intensidad energética la que juega un papel fundamental en la mitigación de las emisiones de CO₂, sino la energía renovable. Asimismo, la relación no es lineal respecto del producto y de la intensidad energética, encontrándose evidencia de que presentan asimetrías dependiendo de si estas variables se encuentran en un régimen de crecimiento positivo o negativo.

Palabras clave

*CO₂; Crecimiento económico; Intensidad energética; Energías renovables;
Datos de panel; América Latina y el Caribe*

O13; Q43; Q5; C23

Abstract

The purpose of this study is to analyze the impact of renewable energy and energy intensity on the relationship between output and CO₂ emissions in Latin American and Caribbean countries. It is based on the estimation of production functions inspired by two alternative theories (STIRPAT and another of neoclassical inspiration) that converge in the same analysis model once linearized. Data from the World Bank and CELADE are used for the construction of a panel of countries between 1970 and 2021, applying the econometric methods of Pooled Ordinary Least Squares and Fixed Effects Models. It is verified that there is a direct relationship between the variation of emissions, product and energy intensity and an inverse relationship with renewable energies. In Latin American and Caribbean countries, unlike in Europe, it is not energy intensity that plays a fundamental role in the mitigation of CO₂ emissions, but renewable energy. Likewise, the relationship is not linear with respect to output and energy intensity, and there is evidence of asymmetries depending on whether these variables are in a positive or negative growth regime.

Keywords

*CO₂; Economic growth; Energy intensity; Renewable Energy; Panel Data;
Latin American and the Caribbean*

O13; Q43; Q5; C23

Tabla de Contenido

Lista de abreviaturas _____	1
Introducción _____	3
Antecedentes y Fundamentos Teóricos _____	6
Antecedentes y justificación.....	6
Marco teórico	11
Hipótesis.....	15
Estrategia de Análisis _____	16
Modelo de análisis y estrategia empírica	16
Datos y definición de los indicadores	17
Resultados Empíricos _____	19
Inercia de las emisiones.....	20
Emisiones de CO ₂ , intensidad energética y energías renovables.....	23
La elasticidad CO ₂ -producto y la tecnología energética.....	25
Energía y efectos asimétricos.....	27
Testeo de robustez y análisis desagregado.....	31
Conclusiones _____	38
Referencias Bibliográficas _____	41
Glosario _____	48
Anexos _____	50
Anexo 1	50
Anexo 2	51

Lista de abreviaturas

ALC	América Latina y el Caribe
ARDL	Modelo de Rezagos Distribuidos
BM	Banco Mundial
CKA	Curva de Kuznets Ambiental
CO ₂	Dióxido de Carbono
CS-ARDL	Cross-Sectional ARDL
CS-DL	Cross-Sectional Augmented Distributed Lag
ER	Energías Renovables
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IEA	Agencia Internacional de la Energía
IPAT	Impact = Population x Affluence x Technology
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático
LMDI	Índice Divisa de Media Logarítmica
MCG	Mínimos Cuadrados Generalizado
MCO	Mínimo Cuadrado Ordinario
MGM	Método Generalizado de Momentos
OCDE	Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico
OLADE	Organización Latinoamérica de Energía
ONU	Organización Naciones Unidas
PCSE	Errores Estándares de Panel Corregido
PIB	Producto Interno Bruto

PMG	Pooled Mean Group Estimator
SHE	Ecología Humana Estructural
STIRPAT	Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology
VECM	Modelo Vectorial de Corrección de Errores

Introducción

Desde la proposición de la Curva de Kuznets Ambiental (CKA) (Grossman & Krueger, 1991; Selden & Song, 1994; Shafik & Bandyopadhyay, 1992), la literatura económica ha dado cuenta, extensamente, de la relación existente en forma de “U” invertida entre el crecimiento de la economía y la calidad ambiental. La CKA, en forma similar a la Curva de Kuznets (Kuznets, 1955), presenta un punto crítico previo al cual la relación entre ambas variables es directa, y luego es inversa. Posteriormente se fueron agregando otras variables que afectan la calidad ambiental como la apertura comercial, la inversión en I & D, la desigualdad de ingresos, el consumo de energía fósil, la población total, los flujos de turismo, entre otras.

Más recientemente, la incorporación de nuevas fuentes renovables de energía y de políticas para dotar de mayor eficiencia al uso de la energía en las actividades humanas de consumo y producción, ha introducido cambios en la relación, lo que ha sido documentado en trabajos recientes referidos a algunas economías desarrolladas (Barrera-Santana et al., 2021; Díaz et al., 2020, entre otros) y de diversos niveles de desarrollo (por ejemplo, Kazemzadeh et al., 2022).

Este trabajo pretende contribuir a la literatura empírica que estudia la relación entre la calidad ambiental y el crecimiento, y sobre el eventual impacto de las tecnologías energéticas en esta relación. Específicamente, se analiza la relación entre las emisiones de CO₂ y el producto, incorporando la dinámica del sector energético en los países de América Latina y el Caribe (ALC) integrantes de la OLADE¹, para un período extenso, de 1970 a 2021. Resulta de interés estudiar qué cambios se provocan en la forma funcional de la CKA al incorporar a las variables comúnmente utilizadas en los estudios empíricos de la relación entre las emisiones de CO₂ y el crecimiento económico: la intensidad energética -energía consumida por unidad de producto- y la participación de las energías renovables.

A pesar de que la actividad económica impacta en distintas dimensiones del medio ambiente (Kazemzadeh et al., 2022) es muy extendido el uso de las emisiones de CO₂ como proxy de la calidad ambiental (Shahbaz et al., 2016). Ello se debe a que uno de los factores que afectan la calidad ambiental son las emisiones antropogénicas (producidas por la actividad humana) de gases de efecto invernadero (GEI), en donde se destaca el CO₂ por su participación dentro de éstos. Su control ha sido desde tiempo atrás una de las principales preocupaciones ambientales de la

¹ La OLADE está integrada por Argentina, Barbados, Belice, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, El Salvador, Grenada, Guatemala, Guyana, Haití, Honduras, Jamaica, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Perú, República Dominicana, Suriname, Trinidad y Tobago, Uruguay y Venezuela.

comunidad internacional, ya que es el gas más importante en cuanto al cambio climático (Greenhouse Gases, s. f.), debido, principalmente, a dos razones. En primer lugar, es el más abundante, hay demasiado del mismo y cada año se agregan más de 35 mil millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera, básicamente por la quema de combustibles ricos en carbono como el carbón y el petróleo. En segundo lugar, dura un largo tiempo en la atmósfera, por lo que aun cuando se paren hoy todas las emisiones de CO₂, pasaría un largo tiempo antes que las emisiones pasadas dejen de retener el calor. Específicamente en ALC, el CO₂ tiene una alta participación en el total de emisiones de GEI e incidencia en su crecimiento, como puede apreciarse en la *Tabla 1*.

Tabla 1: Emisiones de GEI en América Latina y el Caribe (ALC)

Gas	Emisiones (10 ³ t)		Participación		Crecimiento	Incidencia
	1970	2020	1970	2020		
Anhídrido Sulfuroso (SO ₂)	1.853	3.410	0,43%	0,23%	84,07%	0,36%
Dióxido de Carbono (CO ₂)	413.957	1.435.029	96,39%	96,42%	246,66%	237,77%
Hidrocarburos	707	4.453	0,16%	0,30%	529,98%	0,87%
Monóxido de Carbono (CO)	10.175	34.235	2,37%	2,30%	236,47%	5,60%
Óxido de Nitrógeno (NO _x)	2.647	10.948	0,62%	0,74%	313,55%	1,93%
Partículas	107	215	0,02%	0,01%	100,80%	0,03%
GEI	429.445	1.488.291	100,00%	100,00%	246,56%	246,56%

Fuente: Elaboración propia en base a datos de OLADE.

La OCDE (Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico) plantea que los mayores desafíos ambientales a nivel mundial son mitigar las emisiones y disminuir las concentraciones en la atmósfera de los GEI, antes que lleguen a un nivel que interfiera peligrosamente con el sistema climático, y, concomitantemente, adaptarse y gestionar los riesgos del cambio climático (OCDE, s. f.). Postula que para ello se deben desarrollar estrategias nacionales e internacionales orientadas a disminuir las emisiones de carbono y a desacoplar aún más las emisiones de GEI del crecimiento económico. En ese sentido, hoy en día existe consenso de que las energías renovables y la eficiencia energética son claves para enfrentar al cambio climático, a lo que se le agrega el hecho de que sin ellas no es posible el desarrollo económico ni que las energías modernas lleguen a millones de personas (Altomonte, 2017). En forma similar, (OCDE, s. f.), plantea que se debe incrementar la participación de las energías renovables en la oferta energética, y reducir la intensidad energética adoptando procesos de producción eficientes energéticamente e incrementando la eficiencia energética de los bienes y servicios consumidos para lograr una disminución de los GEI de aquí al año 2040.

Este estudio sigue la investigación de (Barrera-Santana et al., 2021), la que, dentro del contexto de un modelo neoclásico de crecimiento que incorpora la energía analiza los determinantes en el corto plazo de las emisiones de dióxido de carbono de un conjunto de países occidentales

Europeos entre 1980 y 2019. Encuentran, por un lado, que la relación entre el crecimiento y las emisiones de CO₂ es fuerte en aquellas economías en que los auges económicos dependen de los sectores intensivos en energía. Por otro, que el papel mitigador de las energías renovables es clave cuando se produce el efecto rebote de la intensidad energética. Otros antecedentes relevantes son (Anser et al., 2020; Díaz et al., 2019, 2020; Hanif, 2017; Marrero, 2010; Taşkın et al., 2020; Usman et al., 2022).

Con este trabajo se contribuye a la literatura empírica existente que aborda la relación entre las emisiones de CO₂ y el producto y estudia como la misma es afectada por otros factores como la intensidad energética y la participación de las energías renovables en la oferta total de energía. Analiza a ALC pues es una región muy vasta, pero con una historia en común que se encuentra en desarrollo, algunos países más que otros, y que goza de abundancia de recursos naturales. Asimismo, resulta de interés analizar como continuar con el crecimiento económico deteriorando lo menos posible el ambiente, logrando alcanzar uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) impulsados por la Organización de Naciones Unidas (ONU), que es obtener una Energía Asequible y no Contaminante (objetivo 7) para satisfacer las necesidades humanas básicas (GA, 2015).

El período estudiado es extenso, comprende cincuenta y dos años de observaciones mensuales, empezando en 1970 coincidiendo con la crisis del petróleo y finalizando prácticamente en nuestros días con la pandemia del Covid en 2021. El interés y relevancia de estudiar este período amplio radica en que durante el mismo se produjo un cambio de paradigma de la matriz energética, pasando de uno basado en combustibles fósiles a uno en que progresivamente se va incorporando las fuentes energéticas renovables. En un principio, éstas eran básicamente la hidroenergía, leña, caña de azúcar y derivados, y luego fueron incorporándose las renovables no tradicionales como la solar y eólica. La consideración de períodos más cortos no permitiría evidenciar claramente la influencia de estos cambios en las tecnologías energéticas sobre la relación entre actividad económica y contaminación. Por último, tomando en cuenta que ALC se caracteriza por la abundancia de recursos naturales y humanos, y poseer distintos grados de desarrollo, es de interés comprobar si las interacciones del producto con la intensidad energética y las energías renovables, juntas o separadas, cambian la capacidad de generar CO₂.

El documento se organiza de esta forma. En la siguiente sección, se presentan los principales antecedentes de la investigación, el marco teórico y las hipótesis. La tercera sección, Estrategia de Análisis y datos, describe el modelo de análisis y el análisis preliminar. La cuarta sección presenta los resultados obtenidos. Finalmente, en la última sección se presentan las principales conclusiones e implicaciones de política que surgen del trabajo.

Antecedentes y Fundamentos Teóricos

En esta sección se presenta, en primer lugar, los antecedentes relacionados con el estudio. En segundo término, se exponen los dos modelos sobre los que se sustenta teóricamente esta investigación. El primero, de enfoque heterodoxo, enmarcado en la teoría Ecología Humana Estructural (SHE) y el segundo, de índole más ortodoxa, basado en una función de crecimiento neoclásica aumentada por la energía. En tercer lugar, se presentan las hipótesis que orientan esta investigación.

Antecedentes y justificación

La energía es vital para el desarrollo económico y social de los países (Chontanawat et al., 2006), pero su uso puede tener efectos negativos en el medio ambiente debido a la liberación de gases de efecto invernadero que provocan el cambio climático. En el informe presentado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 2021) se presentan sus consecuencias: aumento de la temperatura, precipitaciones fuertes, sequías, ciclones y el deterioro del Ártico.

La intensidad en el uso de la energía y en consecuencia el incremento cada vez mayor en las emisiones antropogénicas² de GEI desde la era preindustrial tiene básicamente su origen en el crecimiento poblacional y económico (IPCC, 2014). Pero hay otros factores que inciden en el uso de la energía, como el avance tecnológico y la incorporación de otras fuentes de energía como las renovables.

De acuerdo a (Ayesha, 2018) el avance tecnológico hace referencia al descubrimiento de nuevos y mejores métodos de producción. En forma más general, resultan en un incremento de la productividad del trabajo, del capital y de otros factores de producción. Como resultado, se puede producir más sin aumentar el consumo de recursos o se puede producir el mismo volumen usando menos recursos. La energía es un factor de producción, es decir, que se podría reducir el uso de energía o producir más usando la misma cantidad de energía.

La incorporación de otras fuentes de energías como las renovables tiene grandes ventajas. Por un lado, la emisión de GEI es casi nula y los costos variables son muy bajos. Esto permite sustituir los combustibles fósiles por nuevas fuentes de energía menos dañinas del medio ambiente y de menor precio. En un principio, su utilización implicaba incurrir en altos costos, pero con el

² Se denomina así a aquellas emisiones producidas por actividades humanas.

paso del tiempo éstos han disminuido, lo que ha permitido seguir incrementando su consumo (aumentando el consumo energético global).

El consumo de energía dado por el avance tecnológico o por la incorporación de nuevas fuentes energéticas se ven reflejadas en la intensidad energética. La misma se define como el ratio entre la energía utilizada y el producto. La disminución de la intensidad no siempre implica una disminución en el uso de energía pues puede originarse por una disminución del uso de energía, por un aumento del producto o, incluso, por un aumento del consumo energético pero acompañado de un incremento del producto más que proporcional. Incluso la disminución del consumo de energía puede dar lugar al fenómeno denominado efecto rebote, que tiene como consecuencia un aumento del consumo energético que se puede dar en forma directa e indirecta (Bruns et al., 2019).

En las últimas décadas se ha dado un gran desarrollo de la literatura empírica que trata de analizar la relación entre el consumo de energía, las emisiones de GEI y el crecimiento económico en distintos países. Dada la orientación de la investigación se presentan diversos casos en los cuales la relación anterior es afectada por la intensidad energética y las energías renovables (Anser et al., 2020; Hanif, 2017; Taşkın et al., 2020; Usman et al., 2022).

En (Díaz et al., 2020) se estudia la relación macroeconómica entre crecimiento y cambio climático en un panel de 150 países. Las variables que utilizan son emisiones anuales, PIB per cápita en paridad del poder adquisitivo, mix energético primario y composición sectorial del PIB (con fuente en la Agencia Internacional de Energía, IEA).. Los autores encuentran que el nivel de emisiones acompaña al crecimiento per cápita, a pesar de la existencia de una heterogeneidad importante en elasticidad CO₂-producto. Aplican dos metodologías econométricas, MCO agrupado (en inglés, *Pool-OLS*) con efectos fijos país y temporales, y MGM en sistema (en inglés, *System GMM*). Encuentran que los países que tienen una intensidad energética mayor presentan los niveles superiores de emisiones de CO₂, siendo la composición sectorial del PIB el segundo factor en importancia.

En (Barrera-Santana et al., 2021), para un panel conformado por 16 países occidentales entre 1980 y 2019 y mediante la aplicación de modelos dinámicos de datos de panel, se encuentra que la reducción de la intensidad energética es la acción que proporciona mayores beneficios en cuanto a un menor nivel de emisiones de CO₂. Hallan que las economías que tienen altos niveles de intensidad energética en el pasado reciente, presentan un incremento mucho mayor de las emisiones de CO₂ durante los períodos de auge económico. En el caso de los renovables, el efecto en la elasticidad CO₂-producto es moderado en el corto plazo. Sin embargo, el efecto directo de

atenuación de las energías renovables es particularmente importante cuando la intensidad energética es alta y la economía está en un auge.

En (Dong et al., 2018) se investiga la incidencia de factores tales como la mezcla energética, la intensidad energética, el producto y la población sobre el crecimiento de las emisiones del CO₂, para un panel de 110 países entre 1980 y 2015. Usan dos metodologías, el LMDI (en inglés, *Logarithmic Mean Divisia Index*) y el MGM en sistema. Encuentran que los determinantes principales de las emisiones de CO₂ son el crecimiento del producto -mayormente en países de ingresos altos y medios- y la población -principalmente en países de bajos ingresos-. En función de sus hallazgos, postulan que la caída de la intensidad energética habría amortiguado el efecto del crecimiento sobre las emisiones de CO₂, en especial en los países de altos y medios ingresos. La mezcla energética con una proporción cada vez mayor de combustibles bajos o sin carbono habría contribuido a desacelerar el crecimiento en las emisiones de CO₂ de países de altos ingresos.

En el caso de (Thombs, 2017), se parte de un panel de 129 países en distintas etapas de desarrollo, entre 1990 y 2013. Sus variables dependientes son las emisiones de CO₂ totales y el volumen de CO₂ por unidad de PIB (eficiencia del carbono), las independientes son PIB pc, población total, urbanización, apertura comercial, el porcentaje del PIB industrial y la participación de las energías renovables en el total de energía final consumida. Realiza regresiones Prais-Winsten con errores estándar de panel corregido (PCSE). Concluye que la energía renovable tiene un efecto asimétrico en las emisiones de CO₂ totales y que la eficiencia del carbono varía de acuerdo con la posición económica del país en la economía global. Encuentra que es el consumo de energía renovable la causa de la mayor disminución del total de emisiones de CO₂ y la eficiencia del carbono³ en los países de bajos ingresos, en tanto en los de altos ingresos la influencia de los renovables tanto en las emisiones totales como en la eficiencia del carbono es muy baja. Se produce la “paradoja de la energía renovable” que se expresa de dos formas. Por un lado, cuanto mayor sea el nivel de energía renovable, mayor es el acople entre el crecimiento económico y las emisiones de carbono, es decir que el producto a altos niveles de renovables tiene una mayor incidencia sobre las emisiones de carbono que a bajos niveles. Por otro lado, el efecto de disminución de la eficiencia del carbono resultante del crecimiento económico se reduce a medida que aumentan los niveles de energía renovable.

Por último, (Dahir & Mahi, 2022) analizan la relación dinámica entre la eficiencia energética y la calidad ambiental en los países BRICS⁴ entre los años 1990 y 2018. Como proxy de la variable dependiente calidad ambiental usan las emisiones de CO₂, en tanto las variables

³ Ratio entre emisiones de CO₂ y producto.

⁴ Acrónimo que hace referencia a Brasil, Rusia, India, China y Sudáfrica.

independientes y de control son la eficiencia energética aproximada por el nivel de la intensidad energética -la principal-, el crecimiento económico y el uso de fuentes renovables de energía. Confirman, a través de las pruebas de panel de (Pedroni, 1999) y (Westerlund, 2007), que la eficiencia energética y las emisiones de CO₂ están cointegradas. Encuentran que la eficiencia energética está negativamente correlacionada con las emisiones de CO₂ en el corto y largo plazo. A su vez la energía renovable ayuda a reducir las emisiones de CO₂ en el largo plazo, y el crecimiento económico, a aumentarlas.

En la revisión realizada de la literatura, la gran mayoría de los estudios encontrados que refieren a la región Latinoamérica consideran (además de las variables tradicionales) los factores de energía renovable o de intensidad energética. Son menos los casos que se estudian los efectos conjuntos de la intensidad energética y las energías renovables. A continuación, se presentan algunos ejemplos.

(Fuinhas et al., 2017) examinan los efectos de las políticas de energías renovables en las emisiones de CO₂ de 10 países latinoamericanos entre 1991 y 2012. Concluyen, a partir del análisis de panel ARDL, que las políticas de energías renovables reducen las emisiones en el largo plazo y que, por el contrario, el crecimiento del producto es acompañado por el crecimiento de las emisiones. Para Argentina, entre los años 1970 y 2018, (Yuping et al., 2021) aplican el método de cointegración encontrando que las variables emisiones de CO₂, consumo de energía renovable y no renovable, globalización y crecimiento del producto están asociados en el largo plazo. El ARDL panel mostró evidencias de que en el largo plazo el consumo de la energía renovable y la globalización menguan las emisiones, mientras que el consumo de no renovables tiene el efecto opuesto. A su vez cuando actúan conjuntamente la globalización y el consumo de energía renovable bajan las emisiones, mientras que la interacción entre la globalización y el consumo de energía no renovable, la suben. Asimismo, prueban que se cumple la teoría de la curva ambiental de Kuznets.

Por el contrario, la CKA no pudo ser verificada por (Pablo-Romero & De Jesús, 2016) en 22 países de Latinoamérica, entre los años 1990 a 2011. Sus resultados (obtenidos mediante la aplicación de MCG, mínimos cuadrados generalizado) muestran que mientras el valor agregado bruto crece, el consumo energético lo hace en forma exponencial. Resultados similares se alcanzan en (Naula Pérez, 2020), donde se estudia para Ecuador la relación entre las emisiones de CO₂ y el PIB pc, el consumo de energía eléctrica, la población, la intensidad energética y la intensidad de carbono. El período analizado cubre los años 1988 a 2017, se estima la identidad de Kaya⁵ y se realiza un modelo VECM. No encuentran una relación funcional en forma de U invertida, sino una

⁵ La identidad de Kaya es una identidad contable que relaciona el nivel de las emisiones con el producto y el uso energético: $CO_{2t} = PIB_t / Población_t \times Población_t \times CO_{2t} / Población_t$

relación monótona decreciente donde los niveles altos del PIB están asociados a niveles bajos de CO₂.

Contrariamente, en (Losada et al., 2021) para un panel conformado por los siete países latinoamericanos de menor PIB per cápita -Nicaragua, Honduras, Venezuela, Bolivia, El Salvador, Guatemala y Paraguay- entre 1990 y 2018, encuentran que se cumple la hipótesis de la CKA. Analizan la relación entre las emisiones de CO₂, y el crecimiento del producto y su cuadrado, considerando como variables de control, el consumo de energía eléctrica, el consumo de energía fósil, la densidad poblacional, la industrialización y la producción de energía eléctrica renovable. Hallan que todas las variables tienen una relación directa con las emisiones de CO₂ excepto la producción de energía eléctrica renovable en que es inversa.

De la literatura empírica revisada no se encontraron estudios específicos que exploren para los países de ALC, de qué forma el uso de las energías renovables y los cambios en la intensidad energética afectan la relación entre contaminación y crecimiento cuando actúan separados o combinados, ni las eventuales asimetrías en períodos de auge o decrecimiento económico (como en Barrera-Santana et al. 2021). En este sentido, la presente investigación, pretende contribuir, aportando evidencia empírica para el conjunto de países de esta región. Una segunda contribución de esta investigación refiere a la amplitud del período a estudiar que abarca a las últimas cinco décadas, y permite estudiar esta relación en etapas diferentes en cuanto al paradigma la matriz energética que originalmente era en base a combustibles fósiles y progresivamente fue incorporando fuentes energéticas renovables.

La pregunta específica que busca responder la presente investigación es si la variación de la participación de las energías renovables e intensidad energética en la matriz energética de los países de Latinoamérica produce un efecto significativo sobre las emisiones de CO₂, que modifica la relación en forma de “U” invertida entre el crecimiento económico y contaminación.

En el marco de esta pregunta principal, se plantean otros interrogantes: ¿el efecto mitigador de las energías renovables sobre las emisiones de CO₂ depende de la evolución y niveles de la intensidad energética en América Latina? ¿Cuáles son las diferencias respecto de lo hallado para países más avanzados de Europa? ¿Los efectos son simétricos al alza y a la baja, o, por el contrario, son asimétricos tal cual lo hallado por Barrera-Santana et al. (2021) para países de Europa?

Se espera que esta investigación contribuya a una mayor comprensión del canal de transmisión del producto y energía a las emisiones de CO₂, y que además aporte elementos para

desarrollar políticas públicas más adecuadas y efectivas para deteriorar menos al medio ambiente mientras se transita una senda de crecimiento económico.

Marco teórico

Se plantean dos modelos teóricos alternativos, el STIRPAT y uno de inspiración neoclásica, que se sustentan en teorías distintas, pero de los cuales se obtienen funciones de producción similares, que, al ser linealizadas, llevan al mismo modelo de análisis.

El primero es el que resulta de reformular estocásticamente al modelo IPAT que está guiado por la teoría Ecológica Humana Estructural (SHE). La misma estudia a la relación entre la sociedad y el medio ambiente conceptualizándola como el ecosistema humano que está formado por la interacción de cuatro componentes: población, organización social, medio ambiente y tecnología. El segundo, se basa en los modelos macroeconómicos de uso de la energía. Esta última es un insumo esencial que se mezcla con el capital físico usando una tecnología masilla-arcilla como en el modelo de (Atkeson & Kehoe, 1999) y (Díaz & Puch, 2019). Además el modelo se amplía al agregarse las emisiones de CO₂ como en (Stokey, 1998) o (Golosov et al., s. f.).

El modelo IPAT fue desarrollado por (Ehrlich & Holdren, 1971). Tiene la finalidad de estudiar la relación entre el impacto ambiental (I) con la población (P), la riqueza per cápita (A) y la tecnología (T).

$$I = P \cdot A \cdot T \quad (1)$$

En su documento (Ehrlich & Holdren, 1971) plantean cinco teoremas, que encuentran han sido demostrados como ciertos:

1. El crecimiento de la población causa un impacto negativo desproporcionado en el medio ambiente
2. Se deben estudiar a nivel global conjuntamente los problemas del tamaño y el crecimiento de la población, la utilización y el agotamiento de los recursos y el deterioro del medio ambiente. El control de la población es una condición necesaria pero no suficiente para superar la crisis.
3. La densidad poblacional es una medida pobre de la presión poblacional, y la redistribución de la población podría ser una *pseudo*-solución peligrosa del problema poblacional.

4. El "medio ambiente" debe interpretarse en un sentido amplio para incluir cosas tales como el entorno físico de los guetos urbanos, el entorno del comportamiento humano y el entorno epidemiológico.

5. A menudo las soluciones teóricas a nuestros problemas no son operativas.

Este marco conceptual resulta muy útil para aislar los efectos de las diferentes actividades en el medio ambiente, pero tiene la desventaja de que es muy difícil de sostener el supuesto de que la suma de las elasticidades entre el medio ambiente y la población, economía y tecnología sea unitaria (Dietz & Rosa, 1997). Al ser una identidad contable no es útil para testear hipótesis (York et al., 2003).

Debido a los problemas anteriores (Dietz & Rosa, 1997) lo reformulan obteniendo un modelo estocástico al que llaman STIRPAT (*Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology*), el cual sí permite testear empíricamente hipótesis. La especificación del modelo es la siguiente:

$$I_i = aP_i^b A_i^c e_i \quad (2)$$

En forma similar a (1) utilizan las mismas variables a las que le agregan el subíndice i para enfatizar el hecho de que estas cantidades varían a lo largo de los distintos agentes emisores. Los coeficientes b y c representan el efecto neto de la población y la riqueza respectivamente en el impacto ambiental. A su vez a es una constante que escala el modelo. En el residuo aparece integrado el término tecnología en un sentido amplio, pues se le agregan las organizaciones sociales, las instituciones, la cultura, y todos aquellos factores que afectan el impacto humano en el ambiente que son distintos de la población y la riqueza. Por ende, se plantea el modelo haciendo aparecer la tecnología de la siguiente forma:

$$I_i = aP_i^b A_i^c T_i^d e_i \quad (3)$$

donde T está conformado por la tecnología, la organización social, y la cultura, y d sus efectos. Por último, e representa los efectos de todos aquellos factores no explícitamente incluidos en el modelo.

El modelo STIRPAT, tal como han hecho otros estudios (Aguir Bargaoui et al., 2014; Gani, 2021; Liu et al., 2022; Sztukowski, 2010; York et al., 2003) ha sido extendido en la presente investigación mediante la desagregación de la variable tecnológica, T . Para la variable I se utilizan las emisiones de CO₂, para P la población total, para A el producto per cápita y T se separa en

intensidad energética, IE , y participación de las energías renovables en la oferta primaria, ER . Queda así expresado de la siguiente forma:

$$I_i = aP_i^b A_i^c IE_i^d ER_i^f e_i \quad (4)$$

Si se aplica logaritmos neperianos en ambos miembros de la (4) se obtiene:

$$\ln I_i = \ln a + b \cdot \ln P_i + c \cdot \ln A_i + d \cdot \ln IE_i + f \cdot \ln ER_i + \ln e_i \quad (5)$$

De esta forma, por medio de (5) se analiza la existencia de una relación lineal entre las emisiones de CO₂ y las variables anteriormente nombradas. Como todas las variables están expresadas en logaritmos cada uno de sus coeficientes es su elasticidad. El término independiente es un factor de escala que indica el nivel en logaritmos de las emisiones de CO₂ en el caso que las variables explicativas tomen un valor nulo. Por último, para agregarle incertidumbre a modelo se agrega el ruido blanco e_i en logaritmos neperianos. Se espera que la elasticidad de la población total, el producto pc y la intensidad energética sea positiva mientras que la de las energías renovables sea negativa.

Un modelo teórico alternativo, pero de base neoclásica que fue empleado en (Barrera-Santana et al., 2021), parte de una función de producción neoclásica aumentada por un agregado de la energía usada E_t . Supone que la producción por unidad de trabajo L_t requiere capital y energía quedando expresada de la siguiente manera:

$$y_t = \begin{cases} \tilde{A}_t k_t^\alpha e_t^\theta & \text{si } e_t = v_t k_t \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (6)$$

donde v_t es un índice tecnológico de ahorro energético por unidad de capital (Díaz & Puch, 2019) y A_t representa la productividad total de factores.

Sea,

$$A_t = (\tilde{A}_t v_t^{-\alpha})^{\frac{1}{1-\alpha-\theta}} \quad (7)$$

Si se sustituye (7) en (6) se puede definir la función de producción de la siguiente manera:

$$y_t = A_t \left(\frac{e_t}{y_t} \right)^{\frac{\alpha+\theta}{1-\alpha-\theta}} \quad (8)$$

Para hacer explícitas las diferentes fuentes energéticas definen las emisiones de CO₂, en línea con (Stokey, 1998):

$$EM_t = \tilde{E}_t^\phi Y_t^\varphi, \quad (9)$$

donde \tilde{E}_t es la energía por unidad de CO₂, mientras que E_t es simplemente la energía. A su vez EM_t es el flujo de CO₂. Se hace el supuesto de que, por un lado, hay una sustitución imperfecta entre los diferentes tipos de energía, tanto en la producción como en las emisiones de carbono, y, por otro lado, que el daño climático a la economía opera disminuyendo la productividad total de los factores a largo plazo. Combinando las dos igualdades anteriores, (8) y (9), se llega a la siguiente expresión:

$$EM_t = \frac{\tilde{E}_t^\phi}{E_t} E_t^\phi \left[L_t A_t \left(\frac{E_t}{Y_t} \right)^{\frac{\alpha+\theta}{1-\alpha-\theta}} \right]^\varphi \quad (10)$$

Finalmente, tomando en cuenta que $E_t = v_t K_t$, se puede reparametrizar totalmente la ecuación (10), de la siguiente forma:

$$EM_t = \left(\frac{\tilde{E}_t}{E_t} \right)^\phi \tilde{A}_t^{\gamma_1} v_t^{\gamma_2} Y_t^{\gamma_3} L_t \gamma_4 \left(\frac{E_t}{Y_t} \right)^{\gamma_5} \quad (11)$$

Si se aplican logaritmos neperianos en ambos miembros de la ecuación (11) y empleando la nomenclatura utilizada en la ecuación (5), se llega a:

$$\ln I_i = \ln a + b \cdot \ln P_i + c \cdot \ln A_i + d \cdot \ln IE_i + f \cdot \ln ER_i + \ln e_i, \quad (12)$$

donde

$$\begin{aligned} I &= EM, \\ a &= \gamma_4 \\ P &= L \\ b &= 1 \\ ER &= \frac{\tilde{E}}{E} \\ f &= \phi \\ IE &= \frac{E}{Y} \\ d &= \gamma_5 \\ c &= \gamma_3 \\ e_i &= \tilde{A}_t^{\gamma_1} v_t^{\gamma_2} \end{aligned}$$

De esta forma, al realizar la linealización de (4) y (11) se obtienen dos modelos muy similares, con las mismas variables operativas⁶. Al operativizarlos y agregar más variables

⁶ El coeficiente de la población en (12) es uno, pero se toma como variable para que sea más general la ecuación y parte de los elementos restantes quedan incorporados en el error

independientes y de control se obtiene la misma ecuación tal como se demuestra en la sección *Modelo de Análisis*.

Hipótesis

Sobre la base del marco conceptual antes descrito y los antecedentes relevados, esta investigación tiene como hipótesis principal (H_1), que la variación de la participación de las energías renovables e intensidad energética en la matriz energética de los países ha producido un efecto significativo sobre las emisiones de CO_2 , modificando la relación entre el crecimiento económico y contaminación, en los países de Latinoamérica y del Caribe, entre los años 1970 a 2021.

Estrategia de Análisis

Este capítulo presenta, en primer lugar, el modelo de análisis y estrategia empírica y, en segundo lugar, las variables y datos utilizados, y una breve descriptiva de éstos.

Modelo de análisis y estrategia empírica

Este estudio se sustenta en los modelos representados en (5) y en (12), sobre la base de datos anuales de las variables relevantes y que al operativizarlos se obtiene el mismo modelo de análisis:

$$\Delta \ln EM_{i,t} = \beta_0 + C_i + T_t + \beta_1 \ln EM_{i,t-1} + \beta_2 \Delta POB_{i,t} + \beta_3 \Delta \ln Y_{i,t} + \beta_4 \Delta IE_{i,t} + \beta_5 \Delta REN_{i,t} + \varepsilon_{i,t}, \quad (13)$$

donde $\Delta \ln EM_{i,t}$ es el crecimiento anual de las emisiones de CO₂ per cápita, C_i es un efecto fijo de país que captura las diferencias a largo plazo (no observables) entre países, T_t representa un efecto fijo de tiempo que captura los efectos del ciclo económico global y otros choques globales que pueden estar impulsando conjuntamente las emisiones y la actividad económica. $EM_{i,t-1}$ representa un rezago de un período en las emisiones de CO₂ per cápita (término de inercia o convergencia), $\Delta POB_{i,t}$ es el crecimiento anual en la población total, $\Delta \ln Y_{i,t}$ es el crecimiento anual del PIB per cápita, $\Delta IE_{i,t}$ denota el cambio anual en la intensidad energética, y $\Delta REN_{i,t}$ representa el cambio en la participación de las energías renovables. Finalmente, $\varepsilon_{i,t}$ es una innovación con media cero y varianza constante σ^2 .

La estrategia empírica consiste en estimar diversos modelos econométricos de datos de panel estático y dinámico a partir del modelo base, (13), al cual se le agregan las interacciones del producto con la intensidad energética rezagada un período, $\beta_6 (IE_{i,t-1} \cdot \Delta \ln Y_{i,t})$, y con la participación de las energías renovables rezagadas un período, $\beta_7 (REN_{i,t-1} \cdot \Delta \ln Y_{i,t})$. La finalidad de estas interacciones es investigar si el efecto del crecimiento del producto varía según los niveles que tomen las variables intensidad energética y energía renovable. Al agregarse, se logra que la elasticidad del producto-emisiones que era igual a β_3 y constante, deje de serlo pues pasa a ser $\beta_3 + \beta_6 IE_{i,t-1} + \beta_7 REN_{i,t-1}$. Asimismo, también se estiman regresiones que tengan únicamente como variable explicativa el crecimiento del producto, o se quitan los efectos fijos de país y de tiempo (juntos o de a uno), haciéndose lo mismo con la intensidad energética o la participación de las energías renovables. Por último, se realiza un análisis de robustez conformado por tres estrategias.

Datos y definición de los indicadores

Las variables utilizadas se describen en la *Tabla 2*. Se considera un panel de 21 países pertenecientes a Latinoamérica y el Caribe, con información entre los años 1970 y 2021 (véase listado en *Tabla A.1*, en *Anexo 1*).

Tabla 2: Lista de variables con sus respectivas abreviaturas, unidades y fuentes

Variable	Abreviatura	Unidad	Fuente
PIB per cápita en paridad del poder adquisitivo ⁷	gdppc	US\$ 2017 PPA	BM y OLADE y cálculos propios
Intensidad de Energía Primaria ⁸	ei	10 ³ bep / USD 2017 PPA	BM y OLADE
Participación de las energías renovables en la oferta primaria total ⁹	res_sh	%	OLADE
Emisiones de CO ₂ per cápita	co2pc	t / 10 ³ hab.	OLADE
Población total	pob_tot	10 ³ hab.	OLADE

Fuente: elaboración propia.

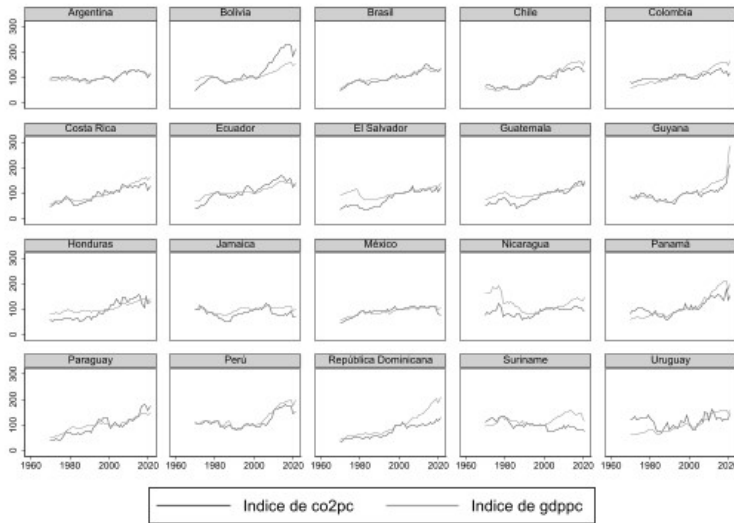
El *Gráfico 1* sugiere que entre los años 1970 – 2021, en los países latinoamericanos podría estar teniendo lugar un fenómeno de acople entre el PIB per cápita y las emisiones de CO₂, en tanto ambos crecen en igual sentido e incluso con una dinámica similar. No obstante, también se observan heterogeneidades entre los países.

⁷ En virtud de que la información recopilada por BM abarcaba el período 1990-2021, para este estudio se calculó nuevamente toda la serie desde el año 1970. Para ello se utilizaron las series de cada país del PIB corriente y constante en moneda nacional, del deflactor implícito del PIB y de los factores de conversión de PPA cuya fuente es el BM y las series de población total cuya fuente es la OLADE.

⁸ Se calcula como la división entre la oferta total de energía primaria (fuente OLADE) y el PIB per cápita.

⁹ Calculada como la suma de las energías renovables hidroenergía, geotérmica, leña, caña y derivados y otras primarias -eólica, solar, geotérmica, etc.- dividido la oferta total de energía primaria. La fuente es la OLADE.

Gráfico 1: PIB per cápita en dólares 2011 (índice) vs. emisiones CO₂ per cápita (índice) entre 1970 y 2021 en los países pertenecientes a la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE)



Fuente: Elaboración propia en base a datos de OLADE y BM.

En el Anexo 2, se presentan los resultados de dos contrastes de raíces unitarias, el de (Maddala & Wu, 1999) y el de (Pesaran, 2007) tanto sobre las variables originales (Tabla A.2.1 y Tabla A.2.2), como sobre las variables finales utilizadas en el estudio (Tabla A.2.3 y Tabla A.2.4). Producto de estos resultados, las variables que están expresadas en porcentajes -Participación de las energías renovables en la oferta primaria total- sólo se diferenciaron y a las restantes - Población total, PIB per cápita en paridad del poder adquisitivo, Intensidad de Energía Primaria y Emisiones de CO₂ per cápita- se les aplicó el logaritmo neperiano y luego se diferenciaron con la finalidad estabilizar y suavizar la serie. En algunos casos -Intensidad de Energía Primaria y Participación de las energías renovables en la oferta primaria total- simplemente se rezagaron un período. En la Tabla 3 se presenta la notación de las variables finales que integran el panel, junto con su descripción.

Tabla 3: Lista de variables utilizadas en el estudio con sus respectivas descripciones

Variable	Descripción
ln_gdppc_gr	Primera diferencia del logaritmo neperiano del gdppc
ei_ch	Primera diferencia de ie
res_sh_ch	Primera diferencia de res_sh
ei_1	ie rezagado un período
res_sh_1	res_sh rezagado un período
ln_co2pc_1	Logaritmo Neperiano de CO ₂ pc rezagado un período
ln pob tot gr	Primera diferencia del logaritmo neperiano de la pob tot

Fuente: elaboración propia.

Resultados Empíricos

En primer término, en la *Tabla 4*, se presenta una descripción estadística de las variables finales (su media, mediana, varianza, mínimo, máximo y número de observaciones), y a continuación la matriz de correlaciones (*Tabla 5*). Posteriormente, se presentan los resultados hallados en subsecciones, incluyéndose, por último, un análisis de robustez.

Tabla 4: Estadísticos descriptivos de las variables (en sus transformaciones)

Variable	Media	Mediana	Varianza	Mínimo	Máximo	Obs.
ln_co2pc_gr	0,013	0,015	0,007	-0,421	0,343	1020
ln_co2pc_l	7,294	7,305	0,481	5,529	8,755	1020
ln_gdppc_gr	0,014	0,019	0,002	-0,338	0,356	1020
ei_ch	0,011	0,001	0,012	-0,660	0,955	1020
res_sh_ch	-0,025	0,000	28,075	-51,384	67,389	1020
ln_pob_tot_gr	0,016	0,016	0,000	-0,059	0,080	1020

Fuente: elaboración propia.

La media, mediana y varianza de todas las variables, son menores que la unidad (esperable, dado que sus valores absolutos son inferiores a 1) excepto las emisiones de CO₂ rezagadas, que varían entre 5 y 9, y las energías renovables, entre -52 y 68, variable que además presenta una varianza elevada.

Tabla 5: Matriz de correlaciones entre las variables

Variable	1	2	3	4	5	6
1. ln_co2pc_gr	-					
2. ln_co2pc_l	-0,145***	-				
3. ln_gdppc_gr	0,524***	-0,022	-			
4. ei_ch	-0,030	0,021	-0,221***	-		
5. res_sh_ch	-0,200***	-0,019	-0,073**	-0,085***	-	
6. ln_pob_tot_gr	0,013	-0,443***	-0,108***	0,058*	0,017	-

*Nota: *** $p < 0,01$, ** $p < 0,05$, * $p < 0,1$.*

Fuente: elaboración propia.

En relación con el crecimiento de las emisiones de CO₂ todas las variables presentan una correlación con el signo esperado. La excepción está dada por la intensidad energética donde se esperaba un signo positivo. Este resultado está probablemente influido por algunos países grandes como Brasil, en donde la mayor parte de la energía usada es renovable (prácticamente es toda hidroeléctrica), por lo que las emisiones de CO₂ son bajas haciendo que a pesar de que la intensidad energética sea alta resulte en emisiones bajas. Se observa que la correlación del crecimiento de las

emisiones con la intensidad energética y la población total no es significativa, lo cual se verá reflejado en las regresiones que se hacen en las próximas secciones.

Inercia de las emisiones

Para analizar si existe inercia en las emisiones de CO₂ se estiman por MCO las ecuaciones (14), (15), (16) y (17), tanto para cada uno de los países estudiados, como para el conjunto de ellos.¹⁰ En todos los casos los modelos son significativos (el valor-*p* correspondiente al estadístico F -prueba F de Fisher - es menor que 5%), excepto en Suriname, que no es significativo en ninguno de los cuatro modelos planteados.

$$\Delta \ln EM_{i,t} = \beta_0 + \beta_3 \Delta \ln Y_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (14)$$

$$\Delta \ln EM_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 \ln EM_{i,t-1} + \beta_3 \Delta \ln Y_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (15)$$

$$\Delta \ln EM_{i,t} = \beta_0 + \beta_2 \ln EM_{i,t-2} + \beta_3 \Delta \ln Y_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (16)$$

$$\Delta \ln EM_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 \ln EM_{i,t-1} + \beta_2 \ln EM_{i,t-2} + \beta_3 \Delta \ln Y_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (17)$$

En la *Tabla 6* se presentan los resultados; donde hay cuatro grupos de columnas, el grupo 1 corresponde a la ecuación (14), el grupo 2 a la (15), el grupo 3 a la (16) y el grupo 4 a (17). La fila llamada *Agrupado* corresponde la regresión MCO agrupada de cada una de las cuatro modelizaciones y las siguientes filas, que tienen el nombre de un país, corresponden a la regresión MCO de ese país en particular.

¹⁰ Se realizaron estimaciones en que se incluye la población total pero no se presentaron dado que la variable no era significativa en la mayoría de los casos y los resultados eran similares.

Tabla 6: Elasticidad ingreso del crecimiento de las emisiones de CO₂ per cápita y la inercia del CO₂ en los países de América Latina y el Caribe

	(1)		(2)		(3)		(4)	
	ln gdppc gr	ln gdppc gr	ln co2pc 1	ln gdppc gr	ln co2pc 2	ln gdppc gr	ln co2pc 1	ln co2pc 2
Agrupado	0,969*** (0,049)	0,964*** (0,049)	-0,016*** (0,003)	0,958*** (0,049)	-0,016*** (0,003)	0,969*** (0,050)	-0,047* (0,027)	0,030 (0,027)
Argentina	0,715*** (0,069)	0,706*** (0,071)	-0,024 (0,033)	0,706*** (0,072)	-0,013 (0,034)	0,707*** (0,072)	-0,067 (0,088)	0,049 (0,089)
Bolivia	1,429*** (0,191)	1,481*** (0,177)	-0,044*** (0,015)	1,421*** (0,175)	-0,034** (0,015)	1,484*** (0,196)	-0,079 (0,108)	0,041 (0,104)
Brasil	0,984*** (0,150)	0,959*** (0,171)	-0,008 (0,026)	0,958*** (0,176)	-0,005 (0,026)	0,963*** (0,179)	-0,031 (0,12)	0,024 (0,114)
Chile	0,875*** (0,149)	0,873*** (0,151)	-0,010 (0,022)	0,857*** (0,153)	-0,012 (0,023)	0,832*** (0,159)	0,077 (0,115)	-0,088 (0,116)
Colombia	1,004*** (0,224)	0,944*** (0,228)	-0,060 (0,049)	0,995*** (0,227)	-0,041 (0,048)	0,901*** (0,224)	-0,257** (0,127)	0,186 (0,121)
Costa Rica	2,006*** (0,266)	2,032*** (0,248)	-0,069*** (0,024)	1,971*** (0,257)	-0,054** (0,025)	2,160*** (0,262)	-0,222** (0,101)	0,153 (0,097)
Ecuador	1,506*** (0,254)	1,340*** (0,275)	-0,038 (0,025)	1,300*** (0,277)	-0,047* (0,026)	1,299*** (0,280)	0,024 (0,124)	-0,069 (0,116)
El Salvador	1,305*** (0,254)	1,455*** (0,245)	-0,068*** (0,024)	1,386*** (0,248)	-0,050** (0,025)	1,558*** (0,249)	-0,270** (0,115)	0,205* (0,112)
Guatemala	2,148*** (0,448)	2,203*** (0,446)	-0,044 (0,033)	2,188*** (0,453)	-0,034 (0,034)	2,536*** (0,469)	-0,262** (0,126)	0,217* (0,125)
Guyana	0,893*** (0,165)	0,963*** (0,175)	-0,061 (0,053)	0,923*** (0,170)	-0,048 (0,058)	0,983*** (0,181)	-0,120 (0,122)	0,070 (0,133)
Honduras	0,836** (0,346)	0,865** (0,345)	-0,041 (0,034)	0,899** (0,352)	-0,041 (0,035)	0,805** (0,376)	-0,109 (0,146)	0,065 (0,147)
Jamaica	1,022*** (0,231)	0,981*** (0,237)	-0,043 (0,054)	0,919*** (0,239)	-0,082 (0,055)	0,898*** (0,239)	0,146 (0,124)	-0,215* (0,125)
México	1,099*** (0,149)	0,981*** (0,148)	-0,061** (0,024)	0,940*** (0,147)	-0,073*** (0,023)	0,946*** (0,142)	0,206** (0,101)	-0,255*** (0,092)

Tabla 6 (Continuación)

	(1)		(2)		(3)		(4)	
	ln gdppc gr	ln gdppc gr	ln co2pc 1	ln gdppc gr	ln co2pc 2	ln gdppc gr	ln co2pc 1	ln co2pc 2
Nicaragua	1,045*** (0,142)	1,052*** (0,131)	-0,147*** (0,048)	1,021*** (0,133)	-0,128** (0,048)	1,046*** (0,134)	-0,123 (0,096)	-0,022 (0,096)
Panamá	0,895*** (0,249)	0,883*** (0,247)	-0,077 (0,055)	0,899*** (0,254)	-0,045 (0,057)	0,794*** (0,263)	-0,191 (0,137)	0,130 (0,138)
Paraguay	1,025*** (0,365)	0,968** (0,388)	-0,015 (0,032)	0,910** (0,402)	-0,026 (0,034)	0,851** (0,421)	0,076 (0,145)	-0,100 (0,146)
Perú	0,758*** (0,13)	0,76*** (0,131)	-0,029 (0,032)	0,756*** (0,131)	-0,036 (0,033)	0,748*** (0,133)	0,055 (0,113)	-0,089 (0,115)
República Dominicana	1,204*** (0,254)	1,207*** (0,249)	-0,043 (0,026)	1,223*** (0,257)	-0,038 (0,027)	1,262*** (0,254)	-0,188 (0,12)	0,140 (0,117)
Suriname	0,355 (0,216)	0,342 (0,215)	-0,086 (0,066)	0,333 (0,218)	-0,075 (0,068)	0,328 (0,219)	-0,116 (0,145)	0,029 (0,147)
Uruguay	0,951** (0,395)	0,934** (0,379)	-0,198** (0,086)	0,829** (0,399)	-0,156* (0,09)	0,960** (0,404)	-0,216 (0,146)	0,020 (0,149)

Nota: *** $p < 0,01$, ** $p < 0,05$, * $p < 0,1$.

Fuente: elaboración propia.

El coeficiente β_3 es significativo al 5% y mayor que 0,700 (excepto para Suriname). A su vez, no varía demasiado por país ni modelo (la mediana se ubica entre 0,931 y 1,013 y la media entre 1,072 y 1,103). En cuanto a los coeficientes β_1 y β_2 , cuando se incluyen por separado tienen signo negativo lo cual coincide con lo encontrado por (Barrera-Santana et al., 2021) en Europa. Implica que el efecto de los shocks en las emisiones desaparece a medida que va pasando el tiempo, en una suerte de convergencia absoluta¹¹ de las emisiones de CO₂. Cuando se incluyen simultáneamente los coeficientes β_1 y β_2 , en algunos países alternan los signos (positivo/negativo), en este caso también presentan una inercia absoluta.¹²

Al agregarse como variables de control las emisiones rezagadas uno, dos o ambos períodos se encuentran cambios en la elasticidad producto-CO₂. En (15) la variación en términos absolutos es inferior al 10% (excepto en Ecuador, El Salvador y México, que es menor al 15%). En (16) hay una mayor variación, varían todos menos de 10% y cinco entre 10% y 20%. Por último, en (17) disminuyen los que varían menos de 10%, siete casos varían entre 10% y 20% y el caso extremo es Paraguay con 21%.

Los resultados permiten inferir que la inercia tiene cierta incidencia en la dinámica de las emisiones de CO₂. Al igual que en el estudio de (Barrera-Santana et al., 2021) no aparentan ser determinantes en la definición de la elasticidad CO₂-producto, con la diferencia de que si podrían explicar una pequeña parte de la heterogeneidad de la elasticidad. A su vez en (Díaz et al., 2020) hallan que el crecimiento de las emisiones es menor en los países que tuvieron emisiones más altas en el período anterior, pero al controlar por intensidad energética el resultado de convergencia deja de ser significativo en los países ricos OCDE y se atenúa en los demás.

Emisiones de CO₂, intensidad energética y energías renovables

En la en la *Tabla 7* se plantean siete modelos MCO agrupados con y sin efectos fijos; el correspondiente a la ecuación (14) en la (columna 0), a la ecuación (15) en la (columna 1), a la ecuación (15) con efectos fijos país en (columna 2), y en (columna 3) agregando también efectos tiempo. En las columnas 4, 5 y 6, se incorporan sucesivamente, la intensidad energética, la participación de las energías renovables y ambas variables (en sus respectivas transformaciones). A la regresión de la (columna 6) se le denomina modelo base.

¹¹ Cuando la regresión incluye solamente a las emisiones de CO₂ desfasadas uno o dos períodos hay una convergencia al estado estacionario si el coeficiente de las emisiones desfasadas más uno es menor que uno.

¹² Cuando la regresión incluye a las emisiones de CO₂ desfasadas uno y dos períodos hay una convergencia al estado estacionario si el coeficiente de las emisiones desfasadas un período más uno y el coeficiente de las emisiones desfasadas dos períodos quedan incluidos dentro del Triángulo de Stralkowski que es la región restringida por $\beta_2 + (1 + \beta_1) < 1$, $\beta_2 - (1 + \beta_1) < 1$ y $-1 < \beta_2 < 1$.

Tabla 7: Estimación de datos de panel de la variación de las emisiones de CO₂, crecimiento y energía

	Crecimiento de las emisiones de CO ₂ pc						
	(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
ln_co2pc_1		-0,016*** (0,003)	-0,047*** (0,007)	-0,067*** (0,012)	-0,068*** (0,012)	-0,063*** (0,011)	-0,064*** (0,011)
ln_gdppc_gr	0,969*** (0,052)	0,964*** (0,053)	0,968*** (0,065)	0,849*** (0,067)	0,880*** (0,065)	0,830*** (0,065)	0,857*** (0,065)
ei_ch					0,069*** (0,020)		0,057*** (0,018)
res_sh_ch						-0,002** (0,001)	-0,002** (0,001)
Intercepto	-0,000 (0,002)	0,119*** (0,024)	0,343*** (0,047)	0,483*** (0,088)	0,489*** (0,088)	0,455*** (0,076)	0,462*** (0,076)
Efectos fijos año	No	No	No	Si	Si	Si	Si
Efectos fijos país	No	No	Si	Si	Si	Si	Si
R ²	0,274	0,292	0,301	0,387	0,394	0,408	0,413
N	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020

Nota: *** $p < 0,01$, ** $p < 0,05$, * $p < 0,1$.

Fuente: elaboración propia.

Todas las variables explicativas son significativas en todos los modelos planteados y presentan los signos esperados. Tal como en los modelos de (Anser et al., 2020; Dahir & Mahi, 2022; Fuinhas et al., 2017; Yuping et al., 2021) el signo de las energías renovables es negativo. A su vez, el de las emisiones pasadas también lo es como en el modelo de (Barrera-Santana et al., 2021). Al igual que en (Dahir & Mahi, 2022; Fuinhas et al., 2017; Usman et al., 2022) el signo del crecimiento del producto es positivo. Por último, la intensidad energética presenta signo positivo como en el estudio de (Dahir & Mahi, 2022) en que usó como proxy de la eficiencia energética a la intensidad energética. A medida que se van agregando más variables explicativas va aumentando el poder explicativo del modelo reflejado en el indicador R².

En el caso de (Hanif, 2017) se encuentran algunas consistencias con el presente análisis dado que estudia un panel de países latinoamericanos utilizando como variable explicativa el crecimiento económico y el consumo per cápita de los combustibles fósiles. Ambas son significativas y con una incidencia positiva en el deterioro ambiental. Manteniendo constante el total de energía primaria consumida, un incremento del consumo fósil implica una caída del consumo de energías renovables. Es decir que el signo positivo del coeficiente del consumo de combustible fósil implica un signo negativo de las energías renovables.

En la *Tabla 7* se parte de un modelo en que el crecimiento de las emisiones CO₂ está explicado solamente por el crecimiento del producto (columna 0). Al agregarse las emisiones de CO₂ rezagadas un período (que denota la persistencia), el coeficiente del primero apenas disminuye y el R² sube muy poco (columna 1). Al controlarse por los efectos fijos país, el coeficiente de las

emisiones rezagadas se vuelve más negativo y aumenta levemente el del producto per cápita (columna 2). Si se agregan los efectos fijos año, disminuye el coeficiente del producto y el de las emisiones rezagadas (columna 3).

Se obtienen resultados similares en el estudio de (Barrera-Santana et al., 2021) para países europeos. Por un lado, al incluir los efectos fijos temporales y país, el coeficiente β_1 disminuye sugiriendo que este coeficiente representa una convergencia condicional más que absoluta. En forma similar, (Marrero, 2010) encuentra que en los países europeos existe una convergencia condicional pues la incidencia de las emisiones desfasadas un periodo presenta un coeficiente menor que uno. Por otro lado, la heterogeneidad entre países, reflejada en los efectos fijos, lleva a pequeños cambios en β_3 . Como en (Barrera-Santana et al., 2021), cuando se controla por efectos fijos país y año, el β_3 es menor que cuando solo se controla por efectos fijos país, lo cual estaría indicando que parte de la correlación entre las emisiones y el producto es causado por factores que son comunes a todos los países.

A diferencia de (Barrera-Santana et al., 2021) y de (Díaz et al., 2020), donde la intensidad energética cumplía un papel fundamental, en los resultados de esta investigación no lo es. De hecho, la inclusión de las energías renovables hace que la intensidad energética reduzca su importancia, lo que probablemente sea consecuencia del gran peso de las energías renovables en la oferta energética del continente latinoamericano (en el promedio del período estudiado, 30%, y en 2021, 34%).

La elasticidad CO₂-producto y la tecnología energética

En la *Tabla 8* se presentan los resultados del modelo base, (columna 6, *Tabla 7*), a la que se le agregan las interacciones entre el producto y la intensidad energética del período pasado, y entre el producto y las energías renovables del período pasado (primeramente, por separado, columnas 1 y 2, y luego, en conjunto, columna 3).

Tabla 8: Estimación de datos de panel de la elasticidad CO₂-producto y efectos de la energía

	Crecimiento de las emisiones de CO ₂ pc			
	(0)	(1)	(2)	(3)
ln_co2pc_1	-0,064*** (0,011)	-0,064*** (0,011)	-0,064*** (0,011)	-0,064*** (0,011)
ln_gdppc_gr	0,857*** (0,065)	0,835*** (0,069)	0,801*** (0,099)	0,747*** (0,102)
ei_ch	0,057*** (0,018)	0,071*** (0,016)	0,055*** (0,017)	0,071*** (0,016)
res_sh_ch	-0,002** (0,001)	-0,002** (0,001)	-0,002** (0,001)	-0,002** (0,001)
ln_gdppc_gr x ei_1		0,034* (0,017)		0,040** (0,017)
ln_gdppc_gr x res_sh_1			0,001 (0,001)	0,002 (0,001)
Intercepto	0,462*** (0,075)	0,457*** (0,076)	0,462*** (0,076)	0,457*** (0,077)
Efectos fijos año	Si	Si	Si	Si
Efectos fijos país	Si	Si	Si	Si
R ²	0,413	0,414	0,413	0,414
N	1020	1020	1020	1020

Nota: *** $p < 0,01$, ** $p < 0,05$, * $p < 0,1$.

Fuente: elaboración propia.

Nuevamente las emisiones del período anterior, el crecimiento del producto, la intensidad energética y la participación de las energías renovables son significativas. No ocurre lo mismo en (Barrera-Santana et al., 2021) donde el crecimiento del producto pierde significación cuando se agrega o se sustituye por la interacción con la intensidad energética.

En todos los casos, la interacción entre el producto y las energías renovables (columnas 2 y 3) es no significativa, en tanto la incidencia de las energías renovables se mantiene prácticamente incambiada. En los países europeos sucede algo similar, a lo que (Barrera-Santana et al., 2021) brinda dos explicaciones distintas. La primera es que el incremento de la participación de las energías renovables no es suficiente para modificar la elasticidad CO₂-producto por país. La segunda, refiere a que las energías renovables están más que presentes en los países ricos que tienen tasas de crecimiento moderadas. En ellos las energías renovables mueven la curva CO₂-producto hacia abajo sin modificar la pendiente. En el caso de América Latina, la causa podría estar vinculada a que la gran presencia de las energías renovables lleva a que los cambios, sobre un nivel ya tan alto, no actúen en forma independiente del crecimiento del producto.

Por el contrario, la interacción entre el producto y la intensidad energética siempre es significativa (columnas 1 y 3) y se mueve en el mismo sentido que la intensidad energética y el producto. A partir de la interacción se puede observar que cuanto mayor sea el nivel de la intensidad

energética en el período anterior mayor es la elasticidad CO₂-producto. Así, la intensidad energética tiene dos efectos. Por un lado, llevaría a un incremento de las emisiones, pero, por otra parte, suavizaría la incidencia del crecimiento del PIB en el incremento de las emisiones. Los resultados anteriores también se repiten el estudio para Europa de (Barrera-Santana et al., 2021). De igual forma, para el caso de países pertenecientes a la OECD (Díaz et al., 2020) encuentran que la intensidad energética afecta las emisiones dependiendo de la tecnología y del ciclo de negocios.

Energía y efectos asimétricos

Al igual que Barrera-Santana et al. (2021) para los países europeos, se testea aquí la hipótesis de no-linealidad en los efectos de las variables explicativas para los países de ALC. Una de las formas de analizar si existe una relación no lineal es suponer que se presentan asimetrías resultado de que una variable tiene distinto efecto según esté en un régimen de crecimiento positivo o no. Si el coeficiente es distinto entre ambos regímenes se entiende que se presentan asimetrías y en consecuencia la relación no es lineal. Para incorporar el efecto asimetría de una cierta variable explicativa, en primer lugar, se calcula la primera diferencia, luego se separan en dos grupos según sean cambios positivos o negativos. A continuación, se generan la suma acumulativa positiva y negativa y finalmente se incorporan en la regresión, como dos nuevas variables eliminando la original.

En la *Tabla 9* se plantean once modelos. El primero (columna 0), es el modelo base. Los siguientes tres (columna 1 a 3) consideran la asimetría de una variable explicativa por vez y, en el quinto (columna 4), de todas. En los últimos seis modelos se agregan las interacciones del producto con la intensidad asimétrica y también con la participación de las energías renovables, juntas o por separado.

Tabla 9: Efectos asimétricos del producto, la intensidad energética y los renovables en las emisiones de CO₂

	Crecimiento de las emisiones de CO ₂ pc										
	(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
ln_co2pc_l	-0,064*** (0,011)	-0,074*** (0,012)	-0,064*** (0,011)	-0,064*** (0,011)	-0,074*** (0,011)	-0,074*** (0,012)	-0,076*** (0,011)	-0,076*** (0,011)	-0,076*** (0,011)	-0,076*** (0,011)	-0,077*** (0,010)
ln_gdppc_gr	0,857*** (0,065)		0,855*** (0,064)	0,857*** (0,065)							
ln_gdppc_gr_cumpos		0,831*** (0,068)			0,829*** (0,067)	0,814*** (0,074)	0,797*** (0,072)	0,754*** (0,082)	0,754*** (0,079)	0,695*** (0,089)	0,679*** (0,083)
ln_gdppc_gr_cumneg		-0,882*** (0,067)			-0,879*** (0,067)	-0,868*** (0,072)	-0,869*** (0,071)	-0,810*** (0,078)	-0,811*** (0,074)	-0,759*** (0,083)	-0,757*** (0,077)
ei_ch	0,057*** (0,018)	0,058*** (0,018)		0,057*** (0,018)		0,072*** (0,015)		0,053*** (0,016)		0,072*** (0,015)	
ei_ch_cumpos			0,056*** (0,015)		0,056*** (0,015)		0,063*** (0,013)		0,053*** (0,014)		0,064*** (0,014)
ei_ch_cumneg			-0,057*** (0,017)		-0,057*** (0,017)		-0,076*** (0,013)		-0,054*** (0,016)		-0,076*** (0,013)
res_sh_ch	-0,002** (0,001)	-0,002** (0,001)	-0,002** (0,001)			-0,002** (0,001)		-0,002** (0,001)		-0,002** (0,001)	
res_sh_ch_cumpos				-0,002** (0,001)	-0,002** (0,001)		-0,002** (0,001)		-0,002** (0,001)		-0,002** (0,001)
res_sh_ch_cumneg				0,002** (0,001)	0,002** (0,001)		0,002** (0,001)		0,002** (0,001)		0,002** (0,001)
ln_gdppc_gr_cumpos x ei_l						0,032 (0,019)	0,040* (0,021)			0,045** (0,017)	0,051*** (0,016)
ln_gdppc_gr_cumneg x ei_l						-0,029 (0,018)	-0,025 (0,019)			-0,040** (0,015)	-0,036** (0,016)

Tabla 9: Continuación

	Crecimiento de las emisiones de CO ₂ pc										
	(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
ln_gdppc_gr_cumpos x res_sh_1								0,001	0,001	0,002*	0,002*
								(0,001)	(0,001)	(0,001)	(0,001)
ln_gdppc_gr_cumneg x res_sh_1								-0,001	-0,001	-0,002	-0,002
								(0,001)	(0,001)	(0,001)	(0,001)
Intercepto	0,462***	0,557***	0,461***	0,466***	0,561***	0,554***	0,572***	0,569***	0,573***	0,568***	0,580***
	(0,075)	(0,082)	(0,076)	(0,075)	(0,080)	(0,082)	(0,078)	(0,077)	(0,077)	(0,078)	(0,074)
Efectos fijos año	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Efectos fijos país	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
R ²	0,413	0,415	0,413	0,413	0,415	0,416	0,417	0,416	0,416	0,417	0,419
N	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020

Nota: *** $p < 0,01$, ** $p < 0,05$, * $p < 0,1$.

Fuente: elaboración propia.

Todos los modelos tienen en común un R^2 muy similar cercano al valor promedio 0,415, y las variables explicativas que son comunes a todos los modelos son significativas. Los coeficientes de las energías renovables son iguales en todos los modelos, sea discriminando o no entre el régimen positivo o negativo, lo cual estaría indicando la inexistencia de efectos asimétricos en torno a estas variables. En cambio en (Barrera-Santana et al., 2021) sus coeficientes son distintos en valor absoluto y son significativas, excepto en el régimen negativo.

Los coeficientes del producto e intensidad energética son mayores en valor absoluto en el régimen negativo que en el positivo (columnas 1 y 4 a 10) y (columnas 2 y 4 a 10), respectivamente, indicando la presencia de asimetrías. En cambio en (Barrera-Santana et al., 2021) se produce la situación inversa, los coeficientes anteriores son mayores en el régimen positivo. Los resultados van en la misma dirección que en Barrera-Santana cuando se incorporan la interacción entre el producto y la intensidad energética, pero en este caso el crecimiento del producto deja de ser significativo tanto en el régimen positivo como en el negativo.

Las interacciones del producto con la intensidad energética del período pasado son significativas cuando son acompañadas por la interacción con la participación de las energías renovables (columnas 9 y 10) o cuando se da la interacción del producto en el régimen de crecimiento positivo con la intensidad energética del período pasado (columna 6). En cambio, la interacción del producto con la participación de las energías renovables es significativa en el régimen de crecimiento positivo cuando es acompañada por las interacciones del producto con la intensidad energética (columnas 9 y 10). Esto significa que los diferentes niveles de la intensidad energética, en especial de las energías renovables, explicarían en parte la heterogeneidad observada en la elasticidad CO_2 -producto, en forma muy parecida a lo que sucede en Europa (Barrera-Santana et al., 2021). En ese sentido, se podría concluir al igual que dichos autores, que el efecto sobre las emisiones de las expansiones económicas es en parte amplificadas por la intensidad energética.

También se observa en todos los casos que el coeficiente de la inercia de las emisiones en valor absoluto (columnas 1 a 10) es mayor o igual al del modelo base (columna 0). Se realizan contrastes para comprobar si los efectos son iguales, rechazándose la hipótesis con un nivel de significación de 5%. Ello estaría indicando que las políticas de eficiencia energética y de mayor uso de las energías renovables son útiles para disminuir el CO_2 . Este resultado también coincide con el de (Dong et al., 2020; Thombs, 2017).

Los resultados anteriores van en línea con (Díaz et al., 2020) quienes hallan que no existe una relación lineal entre producto, intensidad energética y emisiones. Lo explican en base a que la

evolución del mix energético primario¹³ depende del nivel de riqueza. El uso de las energías renovables tradicionales es muy intensivo en los países de menor renta, se pasa a las energías fósiles en los de renta media y finalmente invierten en energías de última generación como la solar y la fotovoltaica los de renta más alta.

Testeo de robustez y análisis desagregado

Para realizar el análisis de robustez de los resultados alcanzados se desarrollan tres estrategias. En cada de ellas se hace un comparativo respecto al modelo base (columna 6, *Tabla 7*) al que se le han agregado las interacciones del crecimiento del producto con la intensidad energética y con la participación de las energías variables desfasadas. Al anterior modelo lo llamaremos modelo base ampliado. En primer lugar, partiendo del mismo, se excluye en forma iterativa, un país por vez para identificar si existe alguno que tenga una gran incidencia en los resultados (*Tabla 10*).

¹³ Composición de las distintas fuentes de energía utilizadas para producir energía, bienes intermedios y finales.

Tabla 10: Robustez: impacto de los diferentes países en las estimaciones del modelo base

Modelo agrupado sin:	ln_co2pc_l	ln_gdppc_gr	ei_ch	res_sh_ch	ln_gdppc_gr x ei_l	ln_gdppc_gr x res_sh_l
-	-0,064*** (0,011)	0,747*** (0,102)	0,071*** (0,016)	-0,002** (0,001)	0,04** (0,017)	0,002 (0,001)
Argentina	-0,064*** (0,011)	0,792*** (0,112)	0,069*** (0,016)	-0,002** (0,001)	0,042** (0,016)	0,001 (0,001)
Bolivia	-0,064*** (0,011)	0,736*** (0,105)	0,071*** (0,016)	-0,002** (0,001)	0,043** (0,017)	0,002 (0,001)
Brasil	-0,064*** (0,011)	0,769*** (0,128)	0,086*** (0,019)	-0,002** (0,001)	0,034 (0,046)	0,001 (0,002)
Chile	-0,065*** (0,011)	0,754*** (0,113)	0,07*** (0,015)	-0,002** (0,001)	0,039** (0,017)	0,002 (0,001)
Colombia	-0,063*** (0,012)	0,747*** (0,105)	0,067*** (0,017)	-0,002** (0,001)	0,038** (0,018)	0,002 (0,001)
Costa Rica	-0,061*** (0,011)	0,753*** (0,103)	0,07*** (0,016)	-0,002** (0,001)	0,043** (0,017)	0,001 (0,001)
Ecuador	-0,063*** (0,012)	0,715*** (0,101)	0,068*** (0,016)	-0,002** (0,001)	0,042** (0,018)	0,002 (0,001)
El Salvador	-0,063*** (0,012)	0,759*** (0,103)	0,069*** (0,016)	-0,002** (0,001)	0,041** (0,017)	0,001 (0,001)
Guatemala	-0,062*** (0,011)	0,762*** (0,105)	0,071*** (0,017)	-0,002** (0,001)	0,039** (0,018)	0,001 (0,001)
Guyana	-0,063*** (0,011)	0,734*** (0,103)	0,072*** (0,016)	-0,002** (0,001)	0,042** (0,016)	0,001 (0,002)
Honduras	-0,061*** (0,011)	0,742*** (0,103)	0,072*** (0,015)	-0,002** (0,001)	0,04** (0,017)	0,002 (0,001)
Jamaica	-0,066*** (0,012)	0,752*** (0,119)	0,073*** (0,016)	-0,002** (0,001)	0,043** (0,018)	0,002 (0,001)
México	-0,067*** (0,012)	0,741*** (0,103)	0,06*** (0,02)	-0,002** (0,001)	0,029 (0,018)	0,002 (0,001)

Tabla 10 (Continuación)

Modelo agrupado sin:	ln_co2pc_1	ln_gdppc_gr	ei_ch	res_sh_ch	ln_gdppc_gr x ei_1	ln_gdppc_gr x res_sh_1
Nicaragua	-0,066*** (0,012)	0,719*** (0,102)	0,072*** (0,017)	-0,002** (0,001)	0,044** (0,017)	0,002 (0,001)
Panamá	-0,06*** (0,01)	0,735*** (0,111)	0,069*** (0,017)	-0,002* (0,001)	0,038** (0,018)	0,002 (0,001)
Paraguay	-0,067*** (0,011)	0,749*** (0,108)	0,068*** (0,017)	-0,002** (0,001)	0,034* (0,017)	0,002 (0,001)
Perú	-0,064*** (0,012)	0,766*** (0,114)	0,073*** (0,017)	-0,002** (0,001)	0,042** (0,017)	0,001 (0,001)
República Dominicana	-0,063*** (0,011)	0,692*** (0,087)	0,069*** (0,016)	-0,003*** (0,001)	0,04** (0,017)	0,002* (0,001)
Suriname	-0,069*** (0,013)	0,815*** (0,09)	0,071*** (0,015)	-0,002** (0,001)	0,031* (0,015)	0,001 (0,001)
Uruguay	-0,057*** (0,009)	0,737*** (0,103)	0,081*** (0,015)	-0,001* (0,001)	0,048*** (0,016)	0,002 (0,001)

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados indican que las variables emisiones rezagadas, variación del producto, variación de la intensidad energética y la participación de las energías renovables resultaron significativas con un valor-p menor al 5% en casi todos los casos. Las excepciones fueron aquellos en que se excluye a Uruguay o Panamá, aunque la significación se mantiene al 10%.

Las interacciones del producto con la intensidad energética mantienen su significación al 5%, salvo cuando se excluye a Paraguay o Suriname, casos en los que la significación pasa a 10%, o cuando se excluye Brasil o México (donde pasa a ser no significativo). Ello se explicaría por el peso que tienen estos últimos dos países en la producción latinoamericana.

A diferencia de las anteriores, las interacciones del producto con la participación de las energías renovables no son significativa a menos que solamente se excluya a la República Dominicana alcanzando el 10% de significación. Al compararse los valores de los coeficientes, en ningún caso el resultante de la exclusión de un país presenta grandes diferencias con el promedio (-0,064 las emisiones desfasadas y 0,748 el crecimiento del producto), en tanto la varianza es prácticamente nula (0,000 las emisiones desfasadas y 0,001 el crecimiento del producto).

La segunda estrategia consiste en estimar la regresión eliminando por país las observaciones extremas, que son aquellas que se ubican en los percentiles más bajos o altos del crecimiento y analizar si los resultados son muy sensibles a esta selección (*Tabla 11*).

Tabla 11: Sensibilidad ante disminución de volatilidad

	Crecimiento de las emisiones de CO ₂ pc		
	(0)	(1)	(2)
ln_co2pc_1	-0,064*** (0,011)	-0,065*** (0,013)	-0,067*** (0,013)
ln_gdppc_gr	0,747*** (0,102)	0,822*** (0,118)	0,689*** (0,107)
ei_ch	0,071*** (0,016)	0,068*** (0,014)	0,068*** (0,018)
res_sh_ch	-0,002** (0,001)	-0,003*** (0,001)	-0,002** (0,001)
ln_gdppc_gr x ei_1	0,040** (0,017)	0,034* (0,018)	0,047** (0,018)
ln_gdppc_gr x res_sh_1	0,002 (0,001)	0,000 (0,002)	-0,001 (0,002)
Intercepto	0,457*** (0,077)	0,465*** (0,094)	0,485*** (0,093)
Efectos fijos año	Si	Si	Si
Efectos fijos país	Si	Si	Si
R2	0,414	0,346	0,295
N	1020	940	940

Nota: *** $p < 0,01$, ** $p < 0,05$, * $p < 0,1$.

Fuente: elaboración propia

En la (columna 0, *Tabla 11*) se repite el modelo base ampliado la cual se eliminan las observaciones de los extremos de cada país. Primero el 1% de las observaciones (columna 1) y luego el 5% (columna 2), con el fin de analizar si los resultados están muy afectados por los datos extremos. El poder explicativo del modelo disminuye, sin embargo, la elasticidad producto-emisiones baja. Este hecho podría deberse a que la interacción entre el producto y la intensidad energética suaviza la incidencia del producto en el crecimiento de las emisiones y a su vez potencia la del cambio en la participación de las energías renovables y la intensidad energética. Es decir que la intensidad energética ayudaría a aplanar la CKA.

Como tercera estrategia para el testeo de robustez se dividen las observaciones en dos grupos según el contexto de crecimiento: grupo Bajo (cuando el crecimiento es inferior a la media de crecimiento del país, columna 1, *Tabla 12*) o Alto (cuando el crecimiento es superior a la media del país al que pertenece la observación, columna 2, *Tabla 12*). El objetivo es analizar si la dinámica del modelo base ampliado (columna 0) varía según el grupo al que pertenezca.

Tabla 12: Elasticidad CO₂-PIB bajo diferentes regímenes de crecimiento del producto

	Crecimiento de las emisiones de CO ₂ pc		
	(0)	(1)	(2)
ln_co2pc_1	-0,064*** (0,011)	-0,099*** (0,019)	-0,055*** (0,014)
ln_gdppc_gr	0,747*** (0,102)	0,828*** (0,161)	0,314* (0,163)
ei_ch	0,071*** (0,016)	0,072*** (0,019)	0,074** (0,035)
res_sh_ch	-0,002** (0,001)	-0,003*** (0,000)	-0,002 (0,002)
ln_gdppc_gr x ei_1	0,040** (0,017)	0,045 (0,028)	0,117*** (0,034)
ln_gdppc_gr x res_sh_1	0,002 (0,001)	0,006* (0,003)	-0,000 (0,002)
Intercepto	0,457*** (0,077)	0,675*** (0,140)	0,412*** (0,097)
Efectos fijos año	SI	SI	SI
Efectos fijos país	SI	SI	SI
R ²	0,414	0,485	0,280
N	1020	444	576

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados indican que todas las variables explicativas mantienen los signos esperados, pero no todas son significativas, observándose diferencias por grupo. Conservan la significación en ambos grupos las emisiones de CO₂ desfasadas, el crecimiento del producto y la intensidad energética sola.

En el grupo de bajo crecimiento el coeficiente del crecimiento del producto tiene un mayor peso. Las variables participación de las energías renovables son significativas y levemente mayores en poder absoluto. Ello podría deberse a que se trate de economías en etapas menos avanzadas, donde el crecimiento se logra a costa de un uso intensivo de recursos naturales y deterioro del medio ambiente. Lo anterior también se ve reflejado en la mayor inercia de las emisiones que presentan.

En el grupo de alto crecimiento la intensidad energética tiene una incidencia mayor y su interacción con el producto también es superior e incluso significativa. Asimismo, la incidencia de las emisiones rezagadas es menor. La razón podría encontrarse en que son observaciones ubicadas en la parte derecha de la CKA en la cual pierde importancia la presencia de recursos naturales y pasa al primer lugar el avance tecnológico. En la investigación de (Dong et al., 2018) se encuentra que la eficiencia energética es más prominente en los países de altos y medio-altos ingresos.

En base al análisis anterior es posible concluir que los resultados son poco afectados por la exclusión de ciertos países, observaciones extremas o por el régimen de crecimiento en que se encuentre.

Conclusiones

En esta investigación se explora como la variación en la participación de las energías renovables y la intensidad energética afectan la relación existente entre la variación del producto y la variación en las emisiones de CO₂, en los países de América Latina y el Caribe, durante los años 1970 a 2021. Para realizar el estudio se desarrolla un modelo de análisis basado en una función de producción en la cual la variación de las emisiones está explicada por la variación del producto, de las emisiones de CO₂ desfasadas un período, la intensidad energética, la participación de las energías renovables en la oferta primaria de energía total, un efecto fijo tiempo y un efecto fijo país.

Acorde a lo esperado, los resultados alcanzados muestran que existe una relación directa entre las emisiones de CO₂ y el producto. No es una relación lineal, pues se encontró que la disminución del producto provoca una mayor caída de las emisiones que el aumento de las emisiones que provocaría un incremento del producto igual en términos absolutos.

También se comprobó que existe una relación directa entre la intensidad energética y el producto con las emisiones de CO₂. Ambas variables influyen en forma asimétrica dado que su incidencia en las emisiones es mayor en valor absoluto cuando están creciendo, que cuando están decreciendo. Afectan directamente a las emisiones y también indirectamente por la interacción con el producto.

En el caso de las energías renovables se concluyó que tienen un efecto directo, disminuyendo las emisiones cuando aumentan su participación en el set de energías que cada país utiliza. A diferencia de los factores anteriores no presentan asimetrías. Tampoco se encontró evidencia de que las energías renovables estén relacionadas con el producto. Es más, aparentemente actúan en forma independiente, lo cual probablemente se deba al gran volumen disponible de las mismas en América Latina y el Caribe (en 2021 el 34,5% de la oferta total primaria de energía en el conjunto de los países estudiados era energía renovable).

Se encontraron coincidencias y diferencias entre los resultados hallados para países europeos (Barrera-Santana et al., 2021; Marrero, 2010) y latinoamericanos. Tal como en Europa se halla una cierta inercia en las emisiones de CO₂ indicando la presencia de una convergencia condicional, así como la presencia de ciertos factores comunes a todos los países latinoamericanos y del Caribe que explicarían en parte la relación entre las emisiones y el producto. Pero en los americanos, a diferencia de los europeos en (Barrera-Santana et al., 2021) en que ocupa un papel fundamental la intensidad energética y menor la energía renovable, se invierten los roles. A su vez

para un panel de países latinoamericanos (Anser et al., 2020; Hanif, 2017) encontraron que el deterioro ambiental presenta una relación directa con el crecimiento económico e inversa con las energías renovables.

Una posible explicación del menor rol de la eficiencia energética en la mitigación de la contaminación podría vincularse a que los individuos cambien su comportamiento ambiental de acuerdo a sus niveles de ingreso (Shafik & Bandyopadhyay, 1992). Los países europeos presentan niveles de ingresos más altos por lo cual las personas exigen que se gaste más en conservación o en que se apliquen imposiciones para mantener el ambiente. En cambio, a niveles bajos del ingreso, las personas están más preocupadas por satisfacer sus necesidades básicas como trabajo, comida y vivienda, por lo que no están dispuestos a destinar sus ingresos a invertir en nuevas tecnologías (renovables no tradicionales) que impliquen una disminución en la intensidad energética.

La principal contribución de este estudio es que comprueba que efectivamente una de las formas que puede ser alterada la relación entre el producto y las emisiones de CO₂ es por medio de la influencia de la intensidad energética y, en especial, de las energías renovables. Asimismo, se encuentran diferencias entre ALC y Europa que ameritan futuros estudios que profundicen más en ellas o los estudien simultáneamente.

Como principal implicación de política surge que dada la asimetría presente en la intensidad energética y en producto se tendrían que plantear incentivos a la eficiencia ajustados al ciclo de negocios.

Por otra parte, para fijar los objetivos de las políticas medioambientales se deben tomar en cuenta si se encuentra en una etapa de bajo o alto crecimiento económico. En el caso de las economías de bajo crecimiento tiene mayor incidencia el crecimiento mismo y la participación de las energías renovables. En cambio, en las de crecimiento alto el factor que más incide es la intensidad directa en forma directa e indirecta por su interacción con el producto. Es decir que se precisa una coordinación entre las políticas energéticas y las macroeconómicas (Barrera-Santana et al., 2021).

Dado que no se pudo verificar las energías renovables se movieran junto con el producto no vale la pena darles incentivos, pero si a la diversificación del mix energético incorporando nuevas fuente*s de energía como el hidrógeno verde.

El estudio motiva nuevas y viejas interrogantes, hay muchos factores que afectan la relación entre el crecimiento económico y el deterioro ambiental, y a su vez todos estos factores se pueden

combinar de diversas formas, produciendo diversos resultados. Una revisión extensa de los distintos determinantes que se podrían haber agregado al estudio se pueden encontrar en (Olivares Mendoza & Hernández Rodríguez, 2021, pag. 14-18).

Dada la importancia cada vez mayor de las energías renovables no convencionales en especial de las más nuevas, como el hidrógeno verde, sería relevante hacer un estudio en que estuvieran discriminadas las distintas fuentes de energía.

Una limitación de este estudio es que se decidió trabajar solamente con el CO₂ en vez de utilizar un indicador que sintetice todos los GEI en una medición en CO₂ equivalente. Incluso algunos autores como (Neagu, 2020) proponen usar la huella ecológica dado que rastrea la demanda humana de recursos naturales y los servicios que proporcionan los ecosistemas. Algunos ejemplos empíricos de su uso son (Ergun & Rivas, 2020; Kazemzadeh, Fuinhas, Koengkan, et al., 2022).

Dada la gran disponibilidad de datos se podrán usar técnicas econométricas como la estimación de modelos heterogéneos usando los efectos correlacionados comunes en un panel dinámico donde se tienen un gran grupo de observaciones a lo largo del tiempo y grupos (véase, (Shin et al., 1999); (Chudik et al., 2016)). O, alternativamente, la aplicación de técnicas de econometría geoespacial que permitiría hacer estudios tomando en cuenta la diversidad de ecosistemas y tipos de deterioro ambiental a lo largo y ancho del planeta (Olivares Mendoza & Hernández Rodríguez, 2021).

Referencias Bibliográficas

- Aguir Bargaoui, S., Liouane, N., & Nouri, F. Z. (2014). Environmental Impact Determinants: An Empirical Analysis based on the STIRPAT Model. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 109, 449-458. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.12.489>
- Altomonte, H. (2017). *Las energías renovables: Panorama mundial, latinoamericano y síntesis de tres estudios de caso*. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/41826>
- Anser, M. K., Hanif, I., Alharthi, M., & Chaudhry, I. S. (2020). Impact of fossil fuels, renewable energy consumption and industrial growth on carbon emissions in Latin American and Caribbean economies. *Atmósfera*, 33(3), 201-213.
- Atkeson, A., & Kehoe, P. (1999). Models of energy use: Putty-putty versus putty-clay. *American Economic Review*, 89(4), 1028-1043.
- Ayesha, J. (2018, marzo 2). Technological Progress and Economic Growth | Economics. *Economics Discussion*. <https://www.economicsdiscussion.net/economic-growth/technological-progress-and-economic-growth-economics/30156>
- Barrera-Santana, J., Marrero, G. A., Puch, L. A., & Díaz, A. (2021). CO2 emissions and energy technologies in Western Europe. *SERIEs : Journal of the Spanish Economic Association*, 1-46. <https://doi.org/10.1007/s13209-021-00234-8>
- Bruns, S., Moneta, A., & Stern, D. I. (2019). Macroeconomic Time-Series Evidence that Energy Efficiency Improvements Do not Save Energy. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3336357>
- Chontanawat, J., Hunt, L. C., Pierse, R., & others. (2006). *Causality between energy consumption and GDP: evidence from 30 OECD and 78 non-OECD countries*. Surrey Energy Economics Centre (SEEC), School of Economics, University of Surrey.

- Chudik, A., Mohaddes, K., Pesaran, M. H., & Raissi, M. (2016). Long-run effects in large heterogeneous panel data models with cross-sectionally correlated errors. En *Essays in Honor of man Ullah* (pp. 85-135). Emerald Group Publishing Limited.
- Dahir, A. M., & Mahi, M. (2022). Does energy efficiency improve environmental quality in BRICS countries? Empirical evidence using dynamic panels with heterogeneous slopes. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(8), 12027-12042.
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-16410-z>
- Díaz, A., Marrero, G. A., & Puch, L. A. (2020). Cambio climático, crecimiento económico y el papel de las tecnologías energéticas. *Papeles de economía española*, 164, 120-133.
- Díaz, A., Marrero, G. A., Puch, L. A., & Rodríguez, J. (2019). Economic growth, energy intensity and the energy mix. *Energy Economics*, 81, 1056-1077.
<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.05.022>
- Díaz, A., & Puch, L. A. (2019). Investment, technological progress and energy efficiency. *B.E. Journal of Macroeconomics*, 19(2), N.PAG-N.PAG. bsx.
- Dietz, T., & Rosa, E. A. (1997). Effects of population and affluence on CO2 emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(1), 175-179.
<https://doi.org/10.1073/pnas.94.1.175>
- Dong, K., Dong, X., & Jiang, Q. (2020). How renewable energy consumption lower global CO2 emissions? Evidence from countries with different income levels. *The World Economy*, 43(6), 1665-1698.
- Dong, K., Hochman, G., & Timilsina, G. R. (2018). Are driving forces of CO2 emissions different across countries?: Insights from identity and econometric analyses. *Insights from Identity and Econometric Analyses (June 19, 2018)*. World Bank Policy Research Working Paper, 8477.

- Ehrlich, P. R., & Holdren, J. P. (1971). Impact of Population Growth: Complacency concerning this component of man's predicament is unjustified and counterproductive. *Science*, *171*(3977), 1212-1217.
- Ergun, S. J., & Rivas, M. F. (2020). TESTING THE ENVIRONMENTAL KUZNETS CURVE HYPOTHESIS IN URUGUAY USING ECOLOGICAL FOOTPRINT AS A MEASURE OF ENVIRONMENTAL DEGRADATION. *International Journal of Energy Economics and Policy*, *10*(4), 473-485. <https://doi.org/10.32479/ijeep.9361>
- Fuinhas, J. A., Marques, A. C., & Koengkan, M. (2017). Are renewable energy policies upsetting carbon dioxide emissions? The case of Latin America countries. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*(17), 15044-15054. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9109-z>
- GA, U. (2015). *A/Res/70/1 Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*.
- Gani, A. (2021). Fossil fuel energy and environmental performance in an extended STIRPAT model. *Journal of Cleaner Production*, *297*, 126526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126526>
- Golosov, M., Hassler, J., Krusell, P., & Tsyvinski, A. (s. f.). *Optimal Taxes on Fossil Fuel in General Equilibrium*. 48.
- Greenhouse Gases*. (s. f.). MIT Climate Portal. Recuperado 25 de abril de 2022, de <https://climate.mit.edu/explainers/greenhouse-gases>
- Grossman, G., & Krueger, A. (1991). *Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement* (w3914; p. w3914). National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w3914>
- Hanif, I. (2017). Economics-energy-environment nexus in Latin America and the Caribbean. *Energy*, *141*, 170-178. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.054>
- IPCC. (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. *Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre*

- el Cambio Climático. [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. Ginebra, Suiza: IPCC, 157.*
- IPCC. (2021). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press., 163.*
- Kazemzadeh, E., Fuinhas, J. A., Koengkan, M., Osmani, F., & Silva, N. (2022). Do energy efficiency and export quality affect the ecological footprint in emerging countries? A two-step approach using the SBM–DEA model and panel quantile regression. *Environment Systems and Decisions*. <https://doi.org/10.1007/s10669-022-09846-2>
- Kazemzadeh, E., Fuinhas, J. A., Salehnia, N., & Osmani, F. (2022). The effect of economic complexity, fertility rate, and information and communication technology on ecological footprint in the emerging economies: A two-step stirpat model and panel quantile regression. *Quality & Quantity*. <https://doi.org/10.1007/s11135-022-01373-1>
- Kuznets, S. (1955). Economic Growth and Income Inequality. *The American Economic Review*, 45(1), 1-28.
- Liu, W., Luo, Z., & Xiao, D. (2022). Age Structure and Carbon Emission with Climate-Extended STIRPAT Model-A Cross-Country Analysis. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fenvs.2021.719168>
- Losada, O. H. C., Tovar, M. de los Á. C., & Cabrera, C. J. V. (2021). Incidencia del crecimiento económico sobre el deterioro ambiental en américa latina. *Aglala*, 12(1), Article 1.
- Maddala, G. S., & Wu, S. (1999). A Comparative Study of Unit Root Tests with Panel Data and a New Simple Test. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 61(S1), 631-652. <https://doi.org/10.1111/1468-0084.0610s1631>

- Marrero, G. A. (2010). Greenhouse gases emissions, growth and the energy mix in Europe. *Energy Economics*, 32(6), 1356-1363. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2010.09.007>
- Naula Pérez, E. P. (2020). *El crecimiento económico y el deterioro ambiental en la economía ecuatoriana*. <https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/30613>
- Neagu, O. (2020). Economic Complexity and Ecological Footprint: Evidence from the Most Complex Economies in the World. *Sustainability*, 12(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/su12219031>
- OCDE. (s. f.). «*Environment at a Glance: Climate change*», *Environment at a Glance: Indicators*, www.oecd.org/environment/env-at-a-glance.
- Olivares Mendoza, J. A., & Hernández Rodríguez, C. (2021). ¿La curva ambiental de Kuznets sigue siendo válida para explicar la degradación? Una revisión teórica. *Economía Coyuntural*, 6(3), 3-52.
- Pablo-Romero, M. del P., & De Jesús, J. (2016). Economic growth and energy consumption: The Energy-Environmental Kuznets Curve for Latin America and the Caribbean. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1343-1350. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.029>
- Pedroni, P. (1999). *Critical values for cointegration tests in heterogeneous panels with multiple regressors*. <https://doi.org/10.1111/1468-0084.61.s1.14>
- 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. <https://doi.org/10.1002/jae.951>
- Selden, T. M., & Song, D. (1994). Environmental Quality and Development: Is There a Kuznets Curve for Air Pollution Emissions? *Journal of Environmental Economics and Management*, 27(2), 147-162. <https://doi.org/10.1006/jeeem.1994.1031>
- Shafik, N., & Bandyopadhyay, S. (1992). *Economic growth and environmental quality: Time series and cross-country evidence* (Policy Research Working Paper Series 904). The World Bank. <https://econpapers.repec.org/paper/wbkwbrwps/904.htm>

- Shahbaz, M., Mahalik, M. K., Shah, S. H., & Sato, J. R. (2016). Time-varying analysis of CO₂ emissions, energy consumption, and economic growth nexus: Statistical experience in next 11 countries. *Energy Policy*, *98*, 33-48. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.08.011>
- Shin, Y., Pesaran, M. H., & Smith, R. P. (1999). Pooled Mean Group Estimation of Dynamic Heterogeneous Panels. *Journal of the American Statistical Association*, *94*, 621-634.
- Stokey, N. L. (1998). Are There Limits to Growth? *International Economic Review*, *39*(1), 1-31. <https://doi.org/10.2307/2527228>
- Sztukowski, J. (2010). *A Stirpat Model of Sectoral CO₂ Emissions at the County Scale*. Colorado State University.
- Taşkın, D., Vardar, G., & Okan, B. (2020). Does renewable energy promote green economic growth in OECD countries? *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal*, *11*(4), 771-798. <https://doi.org/10.1108/SAMPJ-04-2019-0192>
- Thombs, R. P. (2017). The Paradoxical Relationship between Renewable Energy and Economic Growth: A Cross-National Panel Study, 1990-2013. *Journal of World-Systems Research*, *23*(2), 540-564. <https://doi.org/10.5195/JWSR.2017.711>
- Usman, A., Muddassir, S., Ullah, S., & Muhammad, I. (2022). Revealing the nexus between nuclear energy and ecological footprint in STIRPAT model of advanced economies: Fresh evidence from novel CS-ARDL model. *Progress in Nuclear Energy*, 104220. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104220>
- Westerlund, J. (2007). Testing for error correction in panel data. *Oxford Bulletin of Economics and statistics*, *69*(6), 709-748. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0084.2007.00477.x>
- 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. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(03\)00188-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(03)00188-5)
- 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.

<https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.07.065>

Glosario

A

Antropógeno: que resulta de la actividad de los seres humanos o producto de esta.

C

Cambio climático: consiste en toda variación significativa en el sistema climático terrestre que dure largos períodos de tiempo, décadas o períodos de tiempo más largos.

Crecimiento (económico) verde: consiste en una forma eficiente de reducir la degradación del medio ambiente y el despilfarro de recursos naturales, e incluso de fomentar el crecimiento económico y el desarrollo garantizando al mismo tiempo el uso sostenible de los recursos naturales sin privar a las generaciones futuras.

E

Energía renovable: se caracteriza por no ser recursos fósiles los cuales se forman continuamente o en poco tiempo por lo cual al usarse racionalmente permite que su disponibilidad no disminuya en el tiempo. Está compuesto por las energías hidroeléctrica, geotérmica, eólica, solar, biomasa (leña, productos de caña, cáscara de arroz, etc.) y otras poco desarrolladas como la mareomotriz y la undimotriz.

Efecto rebote (en inglés *rebound effect*): fenómeno por el que la reducción en el consumo de energía o en las emisiones (en relación con una referencia) asociada a la aplicación de medidas de mitigación en una jurisdicción se compensa en cierto grado a través de cambios inducidos en el consumo, la producción y los precios dentro de la misma jurisdicción.

Entorno epidemiológico: conjunto de factores ambientales (físicos, químicos o biológicos) que afectan a la salud de las poblaciones.

G

GEI: están conformados por aquellos gases y partículas que forman parte de la atmósfera, naturales o antropógenos, que absorben o emiten radiación en cierta frecuencia de onda del espectro de radiación terrestre emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera y por las nubes.

I

Intensidad energética: energía consumida por unidad de producto

Anexos

Anexo 1

Tabla A.1: Lista y número de países de la Organización Latinoamericana de Energía en el estudio

No. de país	Nombre del país	No. de país	Nombre del país	No. de país	Nombre del país
1	Argentina	8	El Salvador	15	Panamá
2	Bolivia	9	Guatemala	16	Paraguay
3	Brasil	10	Guyana	17	Perú
4	Chile	11	Honduras	18	República Dominicana
5	Colombia	12	Jamaica	19	Suriname
6	Costa Rica	13	México	20	Uruguay
7	Ecuador	14	Nicaragua		

Fuente: elaboración propia.

Anexo 2

Tabla A.2.1: Contraste de panel de raíz unitaria de (Maddala & Wu, 1999)

Variable	Rezagos	Sin tendencia		Con tendencia	
		Chi cuadrado	valor-p	Chi cuadrado	valor-p
gdppc	0	13,932	1,000	11,354	1,000
gdppc	1	13,320	1,000	20,756	0,995
gdppc	2	13,307	1,000	28,218	0,919
gdppc	3	14,142	1,000	29,785	0,881
gdppc	4	15,237	1,000	27,443	0,934
gdppc	5	12,600	1,000	19,270	0,998
ei	0	59,312	0,025	48,394	0,170
ei	1	50,548	0,123	44,458	0,289
ei	2	47,753	0,187	54,893	0,059
ei	3	42,694	0,356	27,196	0,939
ei	4	43,052	0,342	22,373	0,989
ei	5	51,323	0,108	32,622	0,790
res_sh	0	76,810	0,000	54,884	0,059
res_sh	1	79,094	0,000	64,271	0,009
res_sh	2	90,633	0,000	101,144	0,000
res_sh	3	44,648	0,283	38,842	0,522
res_sh	4	39,634	0,487	47,263	0,200
res_sh	5	33,432	0,759	29,863	0,879
co2pc	0	24,387	0,975	30,764	0,853
co2pc	1	24,188	0,977	31,801	0,819
co2pc	2	18,879	0,998	27,908	0,925
co2pc	3	22,278	0,989	39,565	0,490
co2pc	4	19,017	0,998	42,156	0,378
co2pc	5	19,706	0,997	44,792	0,278
pob_tot	0	163,285	0,000	206,659	0,000
pob_tot	1	56,543	0,043	150,524	0,000
pob_tot	2	56,524	0,043	50,599	0,122
pob_tot	3	37,656	0,576	87,743	0,000
pob_tot	4	36,244	0,640	58,515	0,029
pob_tot	5	36,131	0,645	55,374	0,054

Fuente: elaboración propia.

Hipótesis nula: serie es $I(1)$. Se asume que existe independencia entre las observaciones del corte.

Tabla A.2.2: Contraste de panel de raíz unitaria de (Pesaran, 2007)

Variable	Rezagos	Sin tendencia			Con tendencia		
		Zt-bar	Valor-p	t-bar	Zt-bar	Valor-p	t-bar
gdppc	0	1,993	0,977	.	3,777	1,000	.
gdppc	1	-1,385	0,083	.	-0,466	0,321	.
gdppc	2	-1,057	0,145	.	-0,069	0,472	.
gdppc	3	-1,007	0,157	.	0,100	0,540	.
gdppc	4	-0,191	0,424	.	1,054	0,854	.
gdppc	5	-0,504	0,307	.	0,805	0,790	.
ei	0	-2,031	0,021	.	-1,922	0,027	.
ei	1	-1,880	0,030	.	-1,917	0,028	.
ei	2	-1,777	0,038	.	-2,482	0,007	.
ei	3	-0,524	0,300	.	-0,412	0,340	.
ei	4	0,220	0,587	.	0,531	0,702	.
ei	5	-0,105	0,458	.	0,208	0,582	.
res_sh	0	-2,050	0,020	.	-1,186	0,118	.
res_sh	1	-1,984	0,024	.	-2,054	0,020	.
res_sh	2	-1,864	0,031	.	-1,856	0,032	.
res_sh	3	0,180	0,571	.	-0,810	0,209	.
res_sh	4	0,793	0,786	.	0,032	0,513	.
res_sh	5	2,152	0,984	.	2,101	0,982	.
co2pc	0	-0,915	0,180	.	0,335	0,631	.
co2pc	1	-1,643	0,050	.	-0,497	0,310	.
co2pc	2	-0,438	0,331	.	0,848	0,802	.
co2pc	3	-0,266	0,395	.	1,314	0,906	.
co2pc	4	-0,154	0,439	.	1,441	0,925	.
co2pc	5	-0,389	0,349	.	1,065	0,857	.
pob_tot	0	1,767	0,961	.	4,717	1,000	.
pob_tot	1	-4,132	0,000	.	-5,185	0,000	.
pob_tot	2	0,833	0,798	.	0,858	0,805	.
pob_tot	3	-2,470	0,007	.	-4,728	0,000	.
pob_tot	4	-2,280	0,011	.	-2,141	0,016	.
pob_tot	5	-2,786	0,003	.	-1,874	0,030	.

Fuente: elaboración propia.

Hipótesis nula: serie es $I(1)$. Se asume que no existe independencia entre las observaciones del corte.

Tabla A.2.3: Contraste de panel de raíz unitaria de (Maddala & Wu, 1999)

Variable	Rezagos	Sin tendencia		Con tendencia	
		Chi cuadrado	valor-p	Chi cuadrado	valor-p
ln_gdppc_gr	0	465,090	0,000	388,924	0,000
ln_gdppc_gr	1	280,876	0,000	224,460	0,000
ln_gdppc_gr	2	190,770	0,000	145,900	0,000
ln_gdppc_gr	3	164,156	0,000	127,962	0,000
ln_gdppc_gr	4	141,338	0,000	105,890	0,000
ln_gdppc_gr	5	104,804	0,000	79,668	0,000
ei_ch	0	866,134	0,000	774,152	0,000
ei_ch	1	430,061	0,000	377,658	0,000
ei_ch	2	311,175	0,000	263,744	0,000
ei_ch	3	249,563	0,000	212,213	0,000
ei_ch	4	163,069	0,000	136,580	0,000
ei_ch	5	133,287	0,000	118,510	0,000
res_sh_ch	0	792,798	0,000	707,929	0,000
res_sh_ch	1	434,428	0,000	371,492	0,000
res_sh_ch	2	316,944	0,000	250,949	0,000
res_sh_ch	3	238,182	0,000	183,307	0,000
res_sh_ch	4	191,742	0,000	145,262	0,000
res_sh_ch	5	156,164	0,000	116,320	0,000
ln_co2pc_gr	0	761,497	0,000	656,778	0,000
ln_co2pc_gr	1	428,691	0,000	347,699	0,000
ln_co2pc_gr	2	228,248	0,000	168,434	0,000
ln_co2pc_gr	3	159,398	0,000	107,574	0,000
ln_co2pc_gr	4	123,584	0,000	78,636	0,000
ln_co2pc_gr	5	106,161	0,000	65,415	0,007
ln_gdppc_gr	0	210,764	0,000	276,205	0,000
ln_pob_tot_gr	1	122,931	0,000	301,356	0,000
ln_pob_tot_gr	2	48,037	0,790	58,812	0,028
ln_pob_tot_gr	3	37,634	0,577	52,616	0,087
ln_pob_tot_gr	4	35,330	0,680	64,253	0,009
ln_pob_tot_gr	5	42,876	0,349	59,604	0,024

Fuente: elaboración propia.

Hipótesis nula: serie es $I(1)$. Se asume que existe independencia entre las observaciones del corte.

Tabla A.2.4: Contraste de panel de raíz unitaria de (Pesaran, 2007) de variables finales

Variable	Rezagos	Sin tendencia			Con tendencia		
		Zt-bar	Valor-p	t-bar	Zt-bar	Valor-p	t-bar
ln_gdppc_gr	0	-14,185	-14,185	.	-13,386	0,000	.
ln_gdppc_gr	1	-11,343	-11,343	.	-10,291	0,000	.
ln_gdppc_gr	2	-8,162	-8,162	.	-6,724	0,000	.
ln_gdppc_gr	3	-6,558	-6,558	.	-5,252	0,000	.
ln_gdppc_gr	4	-4,699	-4,699	.	-3,617	0,000	.
ln_gdppc_gr	5	-2,932	-2,932	.	-1,411	0,079	.
ei_ch	0	-20,206	-20,206	.	-19,649	0,000	.
ei_ch	1	-14,705	-14,705	.	-13,800	0,000	.
ei_ch	2	-11,475	-11,475	.	-10,223	0,000	.
ei_ch	3	-8,823	-8,823	.	-7,804	0,000	.
ei_ch	4	-6,204	-6,204	.	-5,409	0,000	.
ei_ch	5	-4,573	-4,573	.	-3,512	0,000	.
res_sh_ch	0	-17,926	0,000	.	-17,682	0,000	.
res_sh_ch	1	-13,264	0,000	.	-12,698	0,000	.
res_sh_ch	2	-9,912	0,000	.	-8,708	0,000	.
res_sh_ch	3	-7,774	0,000	.	-6,414	0,000	.
res_sh_ch	4	-7,298	0,000	.	-6,169	0,000	.
res_sh_ch	5	-7,084	0,000	.	-5,964	0,000	.
ln_co2pc_gr	0	-19,732	0,000	.	-19,361	0,000	.
ln_co2pc_gr	1	-15,667	0,000	.	-14,484	0,000	.
ln_co2pc_gr	2	-9,300	0,000	.	-7,718	0,000	.
ln_co2pc_gr	3	-6,314	0,000	.	-4,465	0,000	.
ln_co2pc_gr	4	-4,873	0,000	.	-2,994	0,001	.
ln_co2pc_gr	5	-2,977	0,001	.	-0,921	0,179	.
ln_pob_tot_gr	0	-6,452	0,000	.	-6,500	0,000	.
ln_pob_tot_gr	1	-8,482	0,000	.	-8,163	0,000	.
ln_pob_tot_gr	2	-1,669	0,048	.	0,204	0,581	.
ln_pob_tot_gr	3	-2,756	0,003	.	-1,563	0,059	.
ln_pob_tot_gr	4	-2,480	0,007	.	-1,930	0,027	.
ln_pob_tot_gr	5	-2,267	0,012	.	-1,753	0,040	.

Fuente: elaboración propia.

Hipótesis nula: serie es I(1). Se asume que no existe independencia entre las observaciones del corte.