

# Perspectivas sobre la curva de Kuznets ambiental en América: un enfoque de panel estático para el período 2010-2020

## Perspectives on the environmental Kuznets curve in America: a static panel approach for the period 2010-2020

Fecha de recepción: 14 septiembre 2024 Beatriz M. Terán-Pérez<sup>1</sup>, Abril Yuriko Herrera Ríos<sup>2</sup> y Luis Armando Becerra Pérez<sup>3</sup> Fecha de aprobación: 06 enero 2025

<sup>1</sup> Autora de correspondencia: Doctora en Ciencias Administrativas por la Universidad Autónoma de Occidente Profesora e Investigadora de tiempo completo en la Facultad de Ciencias Económicas y Sociales de la Universidad Autónoma de Sinaloa, candidata en el SNI  
Correo electrónico: bea.teran@uas.edu.mx. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7561-9938>.

<sup>2</sup> Doctora en Economía y Empresa por la Universidad Autónoma de Madrid Profesora e Investigadora de tiempo completo en la Facultad de Ciencias Económicas y Sociales de la Universidad Autónoma de Sinaloa, candidata en el SNI  
Correo electrónico: yurikoherrera@uas.edu.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9301-9285>.

<sup>3</sup> Doctor en Ciencias Económicas por la UABC Profesor e Investigador de tiempo completo en la Facultad de Ciencias Económicas y Sociales de la Universidad Autónoma de Sinaloa, Miembro del SNI nivel 2.  
Correo electrónico: becerra@uas.edu.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6919-0621>.

### Resumen

El objetivo del presente estudio es determinar la relación entre crecimiento económico y emisiones de CO<sub>2</sub>, a través de la hipótesis de la Curva de Kuznets Ambiental, para 25 países del continente americano que abarca el período 2010–2020. La metodología utilizada es un modelo con datos de panel que emplea una regresión de panel estático con clúster, midiendo las emisiones de CO<sub>2</sub> y su relación con las variables PIB per cápita, consumo de energía eléctrica, ingresos por impuestos ambientales, exportaciones e importaciones en América. El resultado del modelo permite visualizar una asociación en forma de U invertida entre la degradación ambiental y las variables consideradas, las estimaciones tienen los signos esperados y son estadísticamente significativas, dando como resultado apoyo empírico a la presencia de una hipótesis de la Curva Ambiental de Kuznets, evidenciando la necesidad de implementación de políticas públicas que fomenten el cuidado del medio ambiente.

**Palabras clave:** crecimiento económico, emisiones CO<sub>2</sub>, Curva Ambiental de Kuznets, continente americano, datos panel.

**Código JEL:** Q38, Q50, Q51, Q56

### Abstract

This study aims to determine the relationship between economic growth and CO<sub>2</sub> emissions through the hypothesis of the Environmental Kuznets Curve for 25 countries of the American continent covering the period 2010-2020. The methodology used is a panel data model that employs a static panel regression with cluster, measuring CO<sub>2</sub> emissions and their relationship with the variables GDP per capita, electricity consumption, income from environmental taxes, exports, and imports in America. The result of the model allows for visualization of an inverted U-shaped association between environmental degradation

and the variables considered. The estimates have the expected signs and are statistically significant, resulting in empirical support for the presence of a hypothesis of the Environmental Kuznets Curve, evidencing the need to implement public policies that promote environmental care.

**Keywords:** economic growth, CO<sub>2</sub> emissions, Environmental Kuznets Curve, American continent, panel data.

**Code JEL:** Q38, Q50, Q51, Q56

## 1. Introducción

El cambio climático y la degradación ambiental son desafíos globales que requieren una comprensión profunda de cómo el desarrollo económico impacta al medio ambiente (Chen et al., 2024; Naseem et al., 2024; Magazzino et al., 2023). La Curva de Kuznets Ambiental ofrece una de las perspectivas teóricas más conocidas para abordar este tema y demuestra la relación entre el crecimiento económico y las emisiones de gases de efecto invernadero (Azimi & Bian, 2023; Chu, 2021; Fang et al., 2019).

Los gobiernos y las organizaciones internacionales están adoptando medidas más firmes para combatir el cambio climático y promover la sostenibilidad, ya que el aumento de las temperaturas, el derretimiento de los glaciares, el aumento del nivel del mar, los eventos climáticos extremos y los cambios en los patrones de precipitación son cada vez más evidentes en todo el mundo (Adebayo et al., 2022; Adedoyin et al., 2021; Ahmad et al., 2017).

Por lo tanto, es crucial identificar las variables clave que influyen en las emisiones per cápita para que los resultados de este estudio puedan informar significativamente la formulación de políticas ambientales efectivas. El objetivo es verificar si la Curva de Kuznets Ambiental (CKA) se cumple en América desde 2010 hasta 2020 mediante un modelo econométrico con datos de panel que permita identificar algunas variables relacionadas con las emisiones de CO<sub>2</sub> y determinar así si la CKA se cumple para América en la última década.

El uso de un modelo econométrico de datos de panel estático es una metodología avanzada y robusta para analizar una gran cantidad de datos a lo largo de un período prolongado. Esta metodología puede proporcionar resultados precisos y confiables.

Se determinó que era importante analizar América porque, a pesar de la extensa literatura sobre la curva de Kuznets a nivel mundial, existe una necesidad de estudios más específicos que investiguen su aplicabilidad en América durante la última década. Este estudio busca llenar esta brecha y ofrecer una visión más detallada de la relación entre el crecimiento y el medio ambiente en la región. Al mismo tiempo, es posible determinar el nivel de correlación entre las emisiones per cápita y el PIB per cápita en los países de América durante el período 2010-2020, así como las variables que han tenido el mayor impacto en la generación de emisiones.

El artículo está organizado de la siguiente manera: la siguiente sección revisa la literatura de las investigaciones más representativas que relacionan las variables del crecimiento económico y las emisiones de CO<sub>2</sub>, enfatizando las metodologías utilizadas. Posteriormente, se describen la metodología y los datos utilizados en este estudio. Finalmente, se presentan una discusión y una conclusión de los hallazgos obtenidos.

## 2. Revisión de la literatura

Varias investigaciones analizan la relación entre el crecimiento económico, el consumo de energía y los contaminantes ambientales desde dos perspectivas (Apergis & Ozturk, 2015; Bekun et al., 2023). La primera se centra en los contaminantes ambientales y su vínculo con el crecimiento, que están estrechamente relacionados con la prueba de la validez de la hipótesis de la Curva de Kuznets Ambiental (CKA), que postula que la degradación ambiental aumenta durante las primeras etapas del crecimiento económico y luego disminuye con el ingreso per cápita después de alcanzar un umbral (Bao & Lu, 2023; Alsaedi et al., 2022; Gill et al., 2018; Grossman & Krueger, 1995). Los resultados de estos estudios revelan que existe una asociación inconsistente entre las emisiones de CO<sub>2</sub> y el crecimiento porque hay otros factores que dependen en gran medida de las dinámicas específicas a nivel regional y nacional (Fakher et al., 2023; Massagony & Budiono, 2022; Cetin et al., 2022).

La segunda perspectiva respalda evidencia de causalidad entre el consumo de energía y el crecimiento económico; la asociación de las dos variables depende del conjunto de datos, la especificación del modelo y la técnica econométrica



involucrada (Bulut, 2019; Balsalobre-Lorente et al., 2022). En este sentido, un mayor consumo de energía para lograr un ritmo rápido de crecimiento económico causa un deterioro significativo de la calidad ambiental (Çobanoğulları, 2024; Ramzan et al., 2022; Wang & Jiang, 2020). Es decir, el crecimiento económico se caracteriza por la urbanización, la industrialización y el mejoramiento de la infraestructura de transporte, lo que provoca un mayor nivel de consumo de energía y, en última instancia, emisiones de carbono (Pradhan et al., 2024; Ullah et al., 2022; Yang et al., 2015).

### 2.1. Crecimiento económico y emisiones de CO<sub>2</sub>

La sociedad tiende a demandar un entorno saludable y sostenible a medida que aumentan sus niveles de ingreso; estas aspiraciones pueden lograrse si existen mejoras tecnológicas o si los gobiernos imponen controles ambientales más estrictos (Zuhail & Göcen, 2024; Nawapanan et al., 2022; Kan et al., 2019). Actualmente, el crecimiento económico global ha llevado a la generación de contaminantes del aire causados por actividades humanas como la deforestación, el cambio de uso del suelo para convertirlo en tierras para ganadería o agricultura, la producción de electricidad y el uso de vehículos motorizados. En consecuencia, la expansión de la actividad económica y las emisiones de contaminantes tienden a aumentar (Barut et al., 2023; Sun et al., 2021; Vadén et al., 2020).

Las emisiones globales de CO<sub>2</sub> provienen principalmente de varios sectores industriales clave (Mehmood et al., 2024; Zuhail & Göcen, 2024). La industria del transporte, que incluye el transporte marítimo de carga, es responsable de una parte significativa de las emisiones, debido al uso de combustibles fósiles en barcos y vehículos de carga (Awan et al., 2022). La aviación comercial también contribuye significativamente, ya que los aviones son una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero en el sector del transporte. Además, la industria automotriz, impulsada por el consumo masivo de vehículos motorizados, representa otra fuente importante de emisiones de CO<sub>2</sub> (Leal Filho et al., 2023; Li et al., 2023). La producción industrial y la generación de energía a partir de combustibles fósiles también son grandes emisores, consolidándose como sectores clave en la lucha contra el cambio climático. Otros sectores, como la agricultura y la construcción, también juegan un papel importante, aunque en menor medida en

comparación con los mencionados (Fakher et al., 2023; Qin et al., 2024). Una comprensión sectorial de las emisiones es crucial para desarrollar estrategias de mitigación efectivas.

En particular, las emisiones de CO<sub>2</sub> se consideran que tienen la mayor participación en el efecto invernadero en la atmósfera terrestre y se consideran la principal causa del calentamiento global. Por lo tanto, este tipo de emisiones en un país es un indicador de cómo influye en el cambio climático (Li et al., 2016; Wang & Jiang, 2019; Huh, 2020).

Así, Abid (2015) respalda la relación entre el crecimiento económico y las emisiones de carbono en presencia de la economía informal en Túnez desde 1980 hasta 2009; como resultado, obtuvo causalidad unidireccional del crecimiento económico formal a las emisiones de CO<sub>2</sub>, mientras que se demostró causalidad bidireccional entre las emisiones de CO<sub>2</sub> y el PIB.

Por su parte, Lv et al. (2019) investigan el impacto en el equilibrio a corto y largo plazo de las relaciones de causalidad dinámica entre el crecimiento económico, las emisiones de CO<sub>2</sub> y el consumo de combustibles fósiles en China entre 1965 y 2016; utilizando técnicas econométricas (cointegración y causalidad de Granger lineal y no lineal en entornos multivariados) encontraron que las emisiones no solo conducen a un crecimiento económico inmediato, sino también a un crecimiento económico futuro, tanto lineal como no lineal. Es decir, las emisiones de gases de efecto invernadero y/o el consumo de combustibles fósiles no llevan a un freno en el crecimiento económico en China.

El estudio de Khan et al. (2022) respalda una correlación progresiva entre las emisiones de carbono, el crecimiento económico y el uso de energía y petróleo en 18 países entre los 20 principales contribuyentes al sector turístico en el período de 1995 a 2019. La técnica de regresión utilizada muestra que el crecimiento económico tiene un impacto negativo en la degradación ambiental. Por lo tanto, en su búsqueda de lograr un turismo estable y duradero en los países estudiados, los autores consideran, como primer paso, educar a la sociedad para que utilice transporte público y otros combustibles alternativos como tecnologías híbridas avanzadas.

## 2.2. Curva de Kuznets Ambiental

La revisión de la literatura nos permite identificar que la suposición más conocida para investigar los posibles impactos perjudiciales del crecimiento económico en la calidad ambiental es la hipótesis de la Curva de Kuznets Ambiental (CKA). El marco teórico principal de la hipótesis de la CKA se inspira en la idea original de Simon Kuznets (1955), quien planteó una relación en forma de U invertida entre la desigualdad de ingresos y el crecimiento económico; estableció que la desigualdad de ingresos aumenta y alcanza su punto máximo en la fase inicial del desarrollo. Sin embargo, afirmó que después de ese punto, el desarrollo económico y la desigualdad de ingresos mejoran con el crecimiento económico.

Por lo tanto, la Curva de Kuznets Ambiental (CKA) propone una relación en forma de U invertida entre el crecimiento económico y la degradación ambiental, que ha sido probada en diferentes contextos y con diferentes metodologías. Por ejemplo, Adebayo et al. (2022) evalúan el efecto de la complejidad económica en las emisiones de CO<sub>2</sub> en México, Indonesia, Nigeria y Turquía (un grupo de países llamado economías MINT), considerando el papel del desarrollo financiero, el crecimiento económico y el consumo de energía para el período entre 1990 y 2018. Los autores utilizan el método de regresión de momentos cuantil con efectos fijos, lo que les permite encontrar que existe una interrelación en forma de U invertida entre el crecimiento económico y las emisiones de CO<sub>2</sub>, validando así la hipótesis de la CKA.

Wang, Yang y Li (2023) establecen la desigualdad de ingresos como variable umbral, el crecimiento económico como variable explicativa y las emisiones de carbono como variable explicada, y desarrollan un modelo de panel umbral utilizando datos de 56 países. Los resultados empíricos muestran que la desigualdad de ingresos ha cambiado la relación entre el crecimiento económico y las emisiones de carbono de una forma en U invertida a una forma en N, lo que significa que la desigualdad de ingresos redefine la curva de Kuznets ambiental y aumenta la complejidad del desacoplamiento entre el crecimiento económico y las emisiones de carbono.

En la frontera del conocimiento, existen una variedad de estudios empíricos relacionados con la CKA en el continente americano, tanto para países desarrollados como en desarrollo. La Tabla 1 muestra algunos estudios sobre la CKA, que examinan

la relación entre el crecimiento económico y las emisiones de CO<sub>2</sub>, la mayoría de ellos se refieren a grupos de países (Pinilla-Rivera et al., 2018; Ortiz-Paniagua & Gómez, 2021; Zeraibi et al., 2023) y, en menor medida, aquellos estudios que muestran un solo país o ciudad (Bulut, 2019; Haider et al., 2022; Acevedo-Ramos et al., 2023).

Principalmente, desde la perspectiva de la metodología utilizada, algunos estudios desde un marco multivariable usan la metodología del Método Generalizado de Momentos (MGM) (Taghvaei et al., 2022; Wang et al., 2023a), mientras que otros utilizan modelos paramétricos y semiparamétricos aditivos como las regresiones de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) (Arango-Mirando et al., 2020; Bekun et al., 2021; Magazzino et al., 2023) y modelos de estacionariedad de Rezagos Distribuidos Autoregresivos (AR) para analizar relaciones dinámicas con datos de series temporales en una sola ecuación (Haider et al., 2022; Çobanoğulları, 2024).

## 3. Metodología

### 3.1 Especificación del modelo

Para este estudio, se utilizó un enfoque econométrico. Este enfoque implicó analizar datos de panel de una muestra de 25 naciones americanas desde 2010 hasta 2020. Este enfoque consistió en crear un modelo de regresión lineal de panel, donde se consideraron clústeres en los residuales en términos geográficos y temporales.

### 3.2. Variables del modelo

Se propuso un modelo considerando variables endógenas como las emisiones per cápita de 25 países desde 2010 hasta 2020 y variables exógenas como el PIB per cápita, el consumo de electricidad, los ingresos fiscales y las importaciones/exportaciones como porcentaje del PIB. Esta elección se basa en el hecho de que estas variables se utilizan ampliamente para calcular la degradación ambiental. Esta selección se alinea con metodologías establecidas, ya que variables como el PIB per cápita y las emisiones per cápita son métricas estándar en análisis económico-ambientales, lo que garantiza la comparabilidad y la confiabilidad al evaluar la degradación ambiental.



**Tabla 1.** Estudios previos que validan/invalidan la hipótesis CKA para Estados Unidos

Artículo	Periodo	Países	Método	Variable dependiente	Variabes explicativas	Hipótesis CKA
Pinilla-Rivera et al. (2018)	1990-2015	10 países, LatAm	Prueba de cointegración	Emisiones de CO <sub>2</sub>	PIB (ecuación logarítmica)	No confirmado
Bulut (2019)	2000-2018	EEUU	Prueba de cointegración	Emisiones de CO <sub>2</sub>	Consumo de energía renovable	Confirmado
Arango-Miranda et al. (2020)	1994-2020	EEUU, Canadá, y México	MCO, VAR	Environmental Degradation	Emisiones de CO <sub>2</sub> , consumo energético, PIB per cápita y apertura comercial	Confirmado (EEUU y México) No confirmado (Canadá)
Ortiz-Paniagua y Gómez (2021)	1970-2016	19 países, LatAm	Prueba de cointegración	Emisiones de CO <sub>2</sub>	PIBpc, PIBpc <sup>2</sup>	Confirmado
Bekun et al. (2021)	1995-2016	Economías del E7 (2 de LatAm)	MCO	Emisiones de CO <sub>2</sub>	PIBpc	Confirmado
Haider et al. (2022)	1970-2020	Canadá	ARDL	N <sub>2</sub> O Emissions	PIBpc, PIBpc <sup>2</sup> , USA, exportaciones	Confirmado
Taghvaei et al. (2022)	1971-2016	Países de la OCDE	GMM	Emisiones de CO <sub>2</sub>	PIB	Confirmado
Zeraibi et al. (2023)	1990-2019	22 países (6 de LatAm)	MCO	Emisiones de CO <sub>2</sub>	PIBpc, Deuda pública, producción de electricidad renovable	Confirmado
Magazzino et al. (2023)	1870-2008	9 países (Canadá)	MCO, EF	Emisiones de CO <sub>2</sub>	PIBpc, PIBpc <sup>2</sup> , Consumo de energía, apertura	Confirmado
Wang, Zhang & Li (2023)	1990-2018	208 países (31 de América)	MGM	Emisiones de CO <sub>2</sub>	PIBpc, índice de capital humano, Consumo de energía renovable, rentas totales de recursos y comercio	Confirmado
Acevedo-Ramos et al. (2023)	1970-2018	Colombia	ARDL	Emisiones de CO <sub>2</sub> , Huella ecológica CH <sub>4</sub> , Emisiones	PIBpc, IED, No-UER, UER, Población urbana, industria, agricultura, silvicultura y pesca	Confirmado

Nota: LatAm: América Latina; MCO: Mínimos Cuadrados Ordinarios; VAR: Regresión Vectorial Analítica; EF: Efecto Fijo; ARDL: Rezagos Distribuidos Autoregresivos; MGM: Método Generalizado de Momentos; N<sub>2</sub>O: Óxido Nitroso; CH<sub>4</sub>: Metano; PIB: Producto Interno Bruto; PIBpc: Producto Interno Bruto per cápita; USA: Uso del Suelo Agrícola; IED: Inversión Extranjera Directa; UER: Uso de Energía Renovable

La formulación final del modelo se presenta a continuación:

$$\text{Emisiones PC} = f(\text{PIBCC}_{it}, \text{GWh}_{it}, \text{IPI}_{it}, \text{I/E PIB}_{it}) + \alpha_i + \varepsilon_{it}$$

[Ec. 1]

Donde:

Emisiones PC = emisiones per cápita

PIBPC = Producto Interno Bruto per cápita

GWh = Consumo de electricidad

IPI= Ingresos fiscales

I/E PIB = importaciones/exportaciones sobre el PIB

i = País

t= Año

### 3.3. Signos y magnitudes de los parámetros

A continuación, se presenta la Tabla 2, que compila las variables del modelo, incluyendo su nomenclatura, significado y signo esperado.

### 3.4. Estimación del modelo

#### 3.4.1. Recopilación de datos para la estimación del modelo

Se utilizaron datos de panel para realizar la predicción del modelo, que combinó elementos temporales y estructurales, específicamente los años y las naciones involucradas en este caso. Este tipo de datos ofrece ciertas ventajas, ya que considera las diferencias individuales y cómo cambian con el tiempo. Además, permite el análisis de modelos más complejos (Gujarati & Porter, 2010).

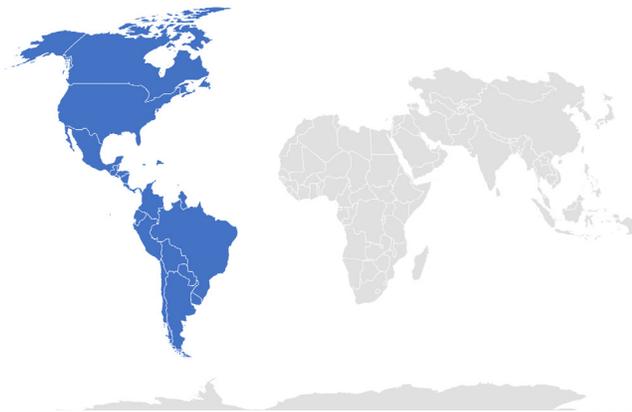
**Tabla 2.** Variables y signos esperados de los coeficientes.

Nomenclatura	Nombre/unidad	Definición	Signo
Emisiones PC	Emisiones de CO <sub>2</sub> per cápita (toneladas)	Las actividades humanas, especialmente en el transporte, la industria y la generación de electricidad, son las principales fuentes de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ), aunque también existe una contribución natural a través del ciclo del carbono terrestre. Las emisiones de CO <sub>2</sub> per cápita reflejan la cantidad de este gas de efecto invernadero emitido por cada individuo y constituyen un indicador clave (EPA, 2023).	
PIB PC	Producto Interno Bruto per cápita (US\$ a precios corrientes)	Es un indicador que ilustra la suma de dinero que cada ciudadano de un país recibiría en el caso de una distribución igualitaria del Producto Interno Bruto generado por esa nación en un año determinado (INEGI, 2023).	Positivo
GWh	Consumo de energía eléctrica (GWh)	Se refiere a la energía disponible en el país y utilizada para diferentes fines. (SEMARNAT, 2023).	Positivo
IPI	Ingresos fiscales totales (millones de dólares)	Son los ingresos recaudados por el gobierno expresados como porcentaje del Producto Interno Bruto (PIB), lo que muestra cuánta producción económica un país recauda a través de impuestos (OCDE, 2020).	Negativo
I/E PIB	Importaciones/exportaciones como porcentaje del PIB (% del PIB)	Se refiere al cálculo en términos monetarios de todas las transacciones de bienes comprados y vendidos por un país con otros países durante un período específico del PIB (SEMARNAT, 2016).	Positivo

Fuente: Elaboración propia, 2024.

El período analizado fue desde 2010 hasta 2020, y los países seleccionados se eligieron en función de su importancia en América (Figura 1), su tamaño y la disponibilidad de información; estos son Canadá, Estados Unidos, México, Belice, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Panamá, Bahamas, Barbados, Jamaica, República Dominicana, Trinidad y Tobago, Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Ecuador, Guyana, Paraguay, Perú y Uruguay. Asimismo, estos datos se obtuvieron de fuentes oficiales como la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), el Banco Mundial y otras fuentes estadísticas.

**Figura 1.** Países de América analizados.



Fuente: Elaboración propia con Bing Technology 2024

## 4. Resultados

### 4.1. Forma matemática del modelo

$$\text{Emisiones PC} = 0.0003 \text{ PIB PC}_{[it]} + 2.521e-06 \text{ GWh}_{[it]} - 3.739e-06 \text{ IPI}_{[it]} + 2.9035 \text{ I/E IB}_{[it]} + \alpha_i + \varepsilon_{it} \quad [\text{Ec. 2}]$$

La ecuación se obtuvo ejecutando el modelo final en el lenguaje de programación Python en Jupyter Notebook con la biblioteca de modelos lineales utilizando PanelOLS con Numpy. Primero, se ejecutó un modelo tradicional de efectos fijos. Sin embargo, se ejecutó un modelo de regresión de panel estático sin efectos fijos ni efectos temporales con agrupación en los residuales para corregir la varianza del error estandarizado para errores autocorrelacionados. Esto permitió corregir la varianza del error estandarizado para errores autocorrelacionados dentro de cada entidad y la varianza del error estandarizado para las series temporales, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 3.

Se decidió incluir la variable Importaciones/Exportaciones como porcentaje del PIB (I/E PIB), aunque resultó aceptable solo al nivel del 90%, ya que su parámetro resultó considerable y nos brinda una buena contribución a la predicción del modelo, afortunadamente esto se reflejó en el aumento del coeficiente R cuadrado.



**Tabla 3.** Resultados generales del modelo

Resumen de estimación de PanelOLS			
Variable dependiente:	Emissiones pc	R-cuadrado:	0.7420
Estimador:	PanelOLS	R-cuadrado (entre grupos):	0.7478
Número de observaciones:	275	R-cuadrado (dentro de grupos):	0.0236
Fecha:	Viernes, 25 de agosto de 2023	R-cuadrado (en general):	0.7420
Hora:	11:19:08	Log-verosimilitud:	-764.82
Estimador de covarianza:	Agrupado	Estadístico F:	194.82
Entidades:	25	Valor P:	0.0000
Promedio de observaciones:	11.000	Distribución:	F(4,271)
Mínimo de observaciones:	11.000	Estadístico F (robusto):	3909.9
Máximo de observaciones:	11.000	Valor P:	0.0000
Periodos de tiempo:	11	Distribución:	F(4,271)
Promedio de observaciones:	25.000		
Mínimo de observaciones:	25.000		
Máximo de observaciones:	25.000		

Estimaciones de los parámetros						
Parámetro	Error Est.	Estadístico	Valor P	IC Inferior	IC Superior	
PIB pc	0.0003	3.706e-05	8.0875	0.0000	0.0002	0.0004
GWh	2.521e-06	5.812e-07	4.3373	0.0000	1.377e-06	3.665e-06
Impuestos	-3.739e-06	1.321e-06	-2.8303	0.0050	-6.341e-06	-1.138e-06
I/E PIB	2.9035	1.6719	1.7367	0.0836	-0.3880	6.1950

Fuente: Elaboración propia, 2024.

### 4.2. Elección de la técnica econométrica adecuada

Se utilizó la función de comparación para comparar el modelo óptimo entre el modelo de regresión de panel estático sin efectos fijos ni temporales y uno con efectos aleatorios. Los resultados obtenidos de esta prueba mostraron que el modelo estático es superior, como se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Comparación del modelo de panel estático y efectos aleatorios

Comparación de Modelos			
	Panel Estático:		Efectos Aleatorios:
	Emissiones pc	Emissiones pc	Efectos Aleatorios
Estimador:	PanelOLS	PanelOLS	Efectos Aleatorios
Número de observaciones:	275	275	275
Estimador de covarianza:	Agrupado	No ajustado	
R-cuadrado:	0.7420	0.3332	
R-cuadrado (entre grupos):	0.0236	0.2513	
R-cuadrado (dentro de grupos):	0.7478	0.6618	
R-cuadrado (en general):	0.7420	0.6585	
Estadístico F:	194.82	33.860	
Valor P (Estadístico F):	0.0000	0.0000	
PIB pc	0.0003 (8.0875)	0.0001 (5.7680)	
GWh	2.521e-06 (4.3373)	3.458e-06 (3.7127)	
Impuestos	-3.739e-06 (-2.8303)	-2.46e-06 (-6.5124)	
I/E PIB	2.9035 (1.7367)	3.4241 (7.7896)	

Estadísticos t reportados entre paréntesis

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Dado que los valores más altos de los estadísticos T se encuentran en el modelo estático, con un mejor R cuadrado y un valor P de 0.0000, se decidió mantener el modelo de regresión de panel estático. El valor P permite comparar las variables Producto Interno Bruto per cápita (PIB PC), Consumo de energía eléctrica (GWh), Ingresos fiscales (TAX), e Importaciones/Exportaciones como porcentaje del PIB (I/E PIB) en el panel estático con los efectos aleatorios.

### 4.3. Evaluación de las estimaciones

Con base en los resultados del modelo, se concluyó que los parámetros son estadísticamente satisfactorios porque el coeficiente de determinación (R<sub>2</sub>) fue alto, y todos los valores P fueron inferiores a 0,10.

Además, al crear el modelo, se utilizó el cuadrado del coeficiente de determinación como herramienta para observar la confiabilidad estadística de las estimaciones de los parámetros del modelo, que fue de 0,7420. Esto resultó en un parámetro aceptable dentro del estudio de las ciencias sociales.

### 4.4. Evaluación del poder predictivo del modelo estimado

A continuación, se evalúa la función del modelo, tomando la media de los datos como valores para las variables y la Ec. 2 como base.

$$\text{Emissiones PC} = 0.0003(13004) + 2.521\text{E-}06 (2.3\text{E}+05) - 3.739\text{E-}06 (2.054582\text{E}+05) + 2.9035 (0.576220) + \alpha_i + \epsilon_{it}$$

[Ec. 3]

$$\text{Emissiones PC} = 5.38\text{tCO}_2$$

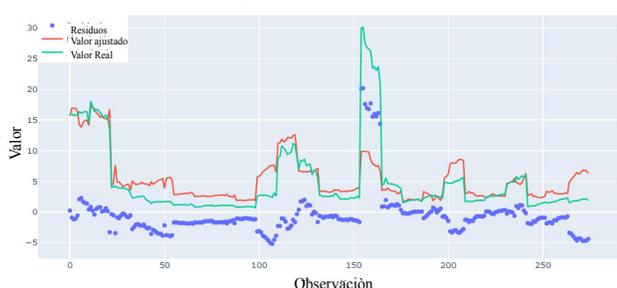
Según el modelo, si consideramos un PIB per cápita de 13,004 dólares, un consumo de energía de 230,000 GWh, ingresos fiscales de 205,458 millones de dólares y un 57.6% de importaciones/exportaciones como porcentaje del PIB, el resultado es un promedio de 5,38 toneladas de dióxido de carbono por año por país.

### 4.5. Análisis de los resultados del modelo

Se realizó un análisis gráfico para evaluar los resultados del modelo final. Este análisis contrasta los resultados estimados con los valores reales y sus residuales, proporcionando una evaluación integral del rendimiento del modelo.

La Figura 2 muestra los resultados de la regresión de panel estática sin efectos fijos ni temporales para los 25 países americanos, que fueron objeto de estudio en esta investigación, desde 2010 hasta 2020. Primero, se presentan los resultados. Los residuales capturan su distribución aleatoria y varianza constante sin un patrón identificable, lo que indica un ajuste correcto de los datos. Además, proporciona una representación gráfica que permite contrastar los datos observados con las estimaciones del modelo, lo cual es esencial para evaluar la capacidad predictiva del modelo. Como es evidente, existe un notable acuerdo entre los datos reales y aquellos ajustados por el modelo, lo que indica una calibración adecuada del modelo.

**Figura 2.** Modelo de panel estático con valores actuales, ajustados y residuales



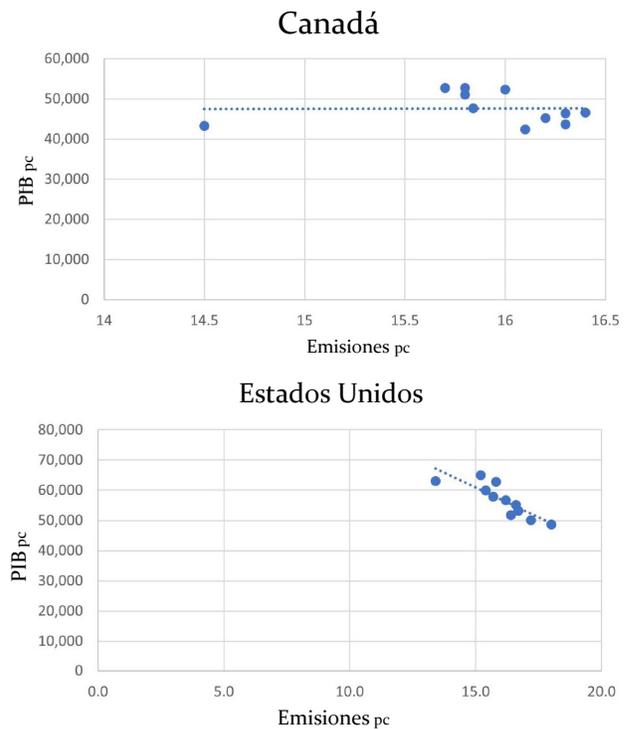
Fuente: Elaboración propia, 2024.

#### 4.6. Análisis de la curva de Kuznets en algunos países

Se realizó un análisis gráfico de algunos países para determinar si se cumple la curva de Kuznets en los países analizados. En el caso de los países desarrollados, se analizaron Canadá y Estados Unidos, encontrando que en el caso de Estados Unidos se cumple la hipótesis de que a medida que avanza la economía, disminuyen sus emisiones, como se muestra en la Figura 3; sin embargo, en Canadá no se encontró una tendencia clara para el período analizado (2010-2020).

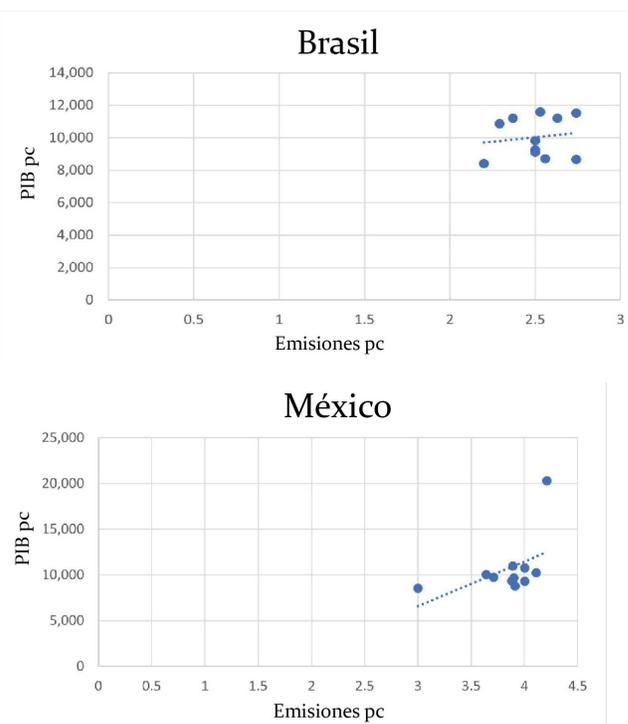
Por el contrario, en los países emergentes, tomando a México y Brasil como referencia (Figura 4), se encontró que ambos tienen una pendiente positiva, cumpliendo con la hipótesis de la curva de Kuznets, que nos dice que, en las etapas iniciales del desarrollo económico, un país tiende a aumentar su degradación ambiental porque se encuentra en una etapa de creciente urbanización y aumento de la producción industrial. Aunque la evidencia empírica encontrada confirma la hipótesis de la curva de Kuznets ambiental (CKA), podrían

**Figura 3.** Curva de Kuznets en los países desarrollados de América



Fuente: Elaboración propia, 2024.

**Figura 4.** Curva de Kuznets en algunos países emergentes de América



Fuente: Elaboración propia, 2024.

existir otras variables exógenas relacionadas con este comportamiento, incluyendo regulaciones ambientales más estrictas en los países desarrollados e impuestos específicos sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>. Es importante destacar que la presión internacional dentro del marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) también podría definir el comportamiento reciente de la CKA.

En el período analizado, la curva de Kuznets se cumple generalmente, ya que en la mayoría de los casos es necesario que los países alcancen su pico de inflexión para reducir las emisiones o para que el gobierno implemente políticas ambientales más rigurosas.

## 5. Discusión

Varios estudios explican la relación entre la degradación ambiental y otras variables, conocida como la curva de Kuznets ampliada (CKA); se agregan variables explicativas adicionales a la propuesta original. Así, los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación confirman la existencia de una CKA para los países de América en el período 2010-2020 a través de un modelo de datos de panel, donde se miden las emisiones de CO<sub>2</sub> y su relación con las variables PIB per cápita, consumo de electricidad, ingresos por impuestos ambientales, exportaciones e importaciones en América.

Estudios previos utilizaron modelos de datos de panel para probar la hipótesis de la CKA y obtuvieron resultados similares y diferentes a esta investigación. Entre ellos, Zeraibi et al. (2023) argumentan que para las economías emergentes desde 1990 hasta 2020, a través de un modelo de mínimos cuadrados ordinarios, existe una relación entre las emisiones de CO<sub>2</sub> y el PIB per cápita en forma de N; es decir, se confirma la hipótesis de la CKA. Sin embargo, en forma de N, no en forma de U invertida para los países de la región, esta forma es sensible si se modifica la muestra de países.

Además, los resultados de Pradhan et al. (2024) argumentan que, entre los países en desarrollo de la región del sur de Asia, con datos que abarcan desde 1996 hasta 2021, existe una relación en forma de U invertida entre las emisiones de CO<sub>2</sub>, el consumo de energía y el crecimiento económico; los autores muestran que un mayor ingreso per cápita fomenta un mayor consumo de energía. Además de las

emisiones, el desarrollo financiero y el crecimiento de la población afectan positivamente al consumo de energía en los países considerados en Asia.

En cuanto a los impuestos ambientales, Vallés-Gimenez y Zarate-Marco (2021) analizan, en el contexto de la CKA, los determinantes de la intensidad de exportación de residuos industriales peligrosos entre regiones españolas, con especial atención a la influencia de los impuestos sobre residuos y las políticas ambientales. En sus hallazgos, sugieren que existe un componente espacial dinámico en la intensidad de exportación y que tanto los impuestos regionales sobre la eliminación de residuos como la rigidez de las políticas ambientales parecen incentivar, aunque modestamente, la tasa de residuos exportados a otras regiones.

La variable de importaciones y exportaciones como porcentaje del PIB, al igual que los hallazgos de Boamah et al. (2017), quienes al investigar el papel del comercio internacional en China (considerando las exportaciones e importaciones totales) en la mitigación de las emisiones de CO<sub>2</sub> a medida que el país avanza económicamente, encontraron una relación en forma de N a largo plazo entre el crecimiento económico y las emisiones, dentro del marco de la CKA estimada. Por lo tanto, se recomienda que China, como líder exportador, transforme su modelo de crecimiento comercial reduciendo las emisiones de CO<sub>2</sub> y fortaleciendo su cooperación internacional al tiempo que adopta más protecciones ambientales.

Como implicación política, deben tomarse medidas para reducir la contaminación ambiental sin sacrificar el crecimiento económico de los países. Algunas de estas medidas incluyen reducir los gases de efecto invernadero procedentes de la industria, el transporte y la calefacción, aumentar el uso del biodiésel y aplicar tecnologías ambientales. No se espera que las políticas se apliquen de manera homogénea en los países, ya que tendrían impactos diferentes dependiendo del nivel de desarrollo de cada país e incluso de la estimación de su posición en la CKA.

Un mayor ingreso per cápita representa una evolución tecnológica que implica la reducción de las presiones ambientales. A su vez, el progreso tecnológico, que puede reflejarse en la producción de bienes y servicios bajo estándares de protección ambiental más estrictos, incentiva a los productores a innovar y, por lo tanto, reduce las emisiones



de CO<sub>2</sub> y, en general, varios contaminantes que degradan la calidad ambiental a nivel local y global, a corto y largo plazo. Este impacto se puede observar en el coeficiente de exportaciones del modelo, ya que resulta ser significativo porque estas exportaciones realizadas por países del continente americano generalmente se realizan bajo estándares de protección ambiental más laxos.

## 6. Conclusiones

La hipótesis de la curva de Kuznets ambiental (CKA) se probó para 25 países del continente americano entre 2010 y 2020 mediante un enfoque econométrico que involucró el análisis de un modelo con datos de panel. La evidencia empírica presentada en este artículo nos permite visualizar una asociación en forma de U invertida entre la degradación ambiental y las variables consideradas para probar la CKA. Las estimaciones tienen los signos esperados y son estadísticamente significativas, lo que resulta en un apoyo empírico para la aceptación de la hipótesis de la CKA en América.

Así, existe un efecto significativo del PIB per cápita, el consumo de electricidad, las importaciones y exportaciones del PIB, y los impuestos relacionados con el medio ambiente sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>. Aunque se reconoce que la relación puede diferir entre países (OCDE, 2013), aquellos que componen el continente americano son responsables de más del 20% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>. Las estimaciones de la hipótesis de la CKA en diferentes países deben considerarse una herramienta esencial para construir políticas ambientales efectivas, ya que la regulación ambiental tiene un efecto moderador sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Una de las limitaciones de esta investigación es que, al igual que la mayoría de los modelos econométricos, no pueden explicar toda la relación entre la variable dependiente y las variables independientes, ya que a menudo son complejas y multidimensionales, lo que dificulta representarlas completamente. Por ejemplo, este artículo no consideró las emisiones de CO<sub>2</sub> de fuentes naturales (volcanes, pantanos, incendios forestales naturales, entre otros), lo que puede generar sesgos en los resultados.

Por lo tanto, como líneas futuras de investigación, considerando la hipótesis de la CKA, sería pertinente explorar la inclusión de factores adicionales que puedan influir en la relación entre el PIB y las emisiones de CO<sub>2</sub>, como las emisiones

de origen natural, que no se consideraron en este estudio. Además, podrían incorporarse modelos econométricos más complejos para capturar mejor la interacción de variables que no son directamente observables; abordar la influencia de fenómenos climáticos y geológicos sobre las emisiones y desarrollar un enfoque más holístico que considere estos elementos externos.

Los hallazgos de este estudio recomiendan firmemente que los formuladores de políticas propongan políticas energéticas y económicas integrales destinadas a fomentar un crecimiento equilibrado en las regiones de los países, considerando en sus agendas acciones que involucren a los diferentes sectores en la incorporación de energías renovables que permitan mejorar la calidad ambiental y reducir la huella ecológica.

## Referencias

- Abid, M. (2015). The Close Relationship between Informal Economic Growth and Carbon Emissions in Tunisia since 1980: The (Ir)relevance of Structural Breaks. *Sustainable Cities and Society*, 15, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.11.001>
- Acevedo-Ramos, J. A., Valencia, C. F., & Valencia, C. D. (2023). The Environmental Kuznets Curve hypothesis for Colombia: impact of economic development on greenhouse gas emissions and ecological footprint. *Sustainability*, 15(4), 3738. <https://doi.org/10.3390/su15043738>
- Adebayo, T. S., Rjoub, H., Akadiri, S. S., Oladipupo, S. D., Sharif, A., & Adeshola, I. (2022). The role of economic complexity in the environmental Kuznets curve of MINT economies: evidence from method of moments quantile regression. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(16), 24248–24260. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17524-0>
- Adedoyin FF, Nwulu N, Bekun FV (2021). Environmental degradation, energy consumption and sustainable development: accounting for the role of economic complexities with evidence from World Bank income clusters. *Business Strategy and the Environment* 30(5), 2727–2740. <https://doi.org/10.1002/bse.2774>
- Ahmad, N., Du, L., Lu, J., Wang, J., Li, H.-Z., and Hashmi, M. Z. (2017). Modelling the CO<sub>2</sub> Emissions and Economic Growth in Croatia: Is There Any Environmental Kuznets Curve? *Energy* 123, 164–172. <https://10.1016/j.energy.2016.12.106>
- Alsaedi, M. A., Abnisa, F., Alaba, P. A., & Farouk, H. U. (2022). Investigating the relevance of Environmental



- Kuznets curve hypothesis in Saudi Arabia: towards energy efficiency and minimal carbon dioxide emission. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24(4), 1285-1300. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02244-3>
- Arango Miranda, R., Hausler, R., Romero Lopez, R., Glaus, M., & Pasillas-Diaz, J. R. (2020). Testing the environmental kuznets curve hypothesis in North America's free trade agreement (NAFTA) countries. *Energies*, 13(12), 3104. <https://doi.org/10.3390/en13123104>
- Apergis, N., & Ozturk, I. (2015). Testing environmental Kuznets curve hypothesis in Asian countries. *Ecological indicators*, 52, 16-22. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.11.026>
- Awan, A., Alnour, M., Jahanger, A., & Onwe, J. C. (2022). Do technological innovation and urbanization mitigate carbon dioxide emissions from the transport sector?. *Technology in Society*, 71, 102128. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.102128>
- Azimi, M., & Bian, Z. (2023). Provincial and regional analysis of carbon neutrality policy and the environmental Kuznets curve: examining their effect on CO<sub>2</sub> emissions in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25419-5>
- Balsalobre-Lorente, D., Ibáñez-Luzón, L., Usman, M., & Shahbaz, M. (2022). The environmental Kuznets curve, based on the economic complexity, and the pollution haven hypothesis in PIIGS countries. *Renewable Energy*, 185, 1441-1455. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.059>
- Bao, Z., and Lu, W. (2023). Applicability of the environmental Kuznets curve to construction waste management: A panel analysis of 27 European economies. *Resources, Conservation and Recycling*, 188, 106667. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106667>
- Barut, A., Kaya, E., Bekun, F. V., and Cengiz, S. (2023). Environmental sustainability amidst financial inclusion in five fragile economies: Evidence from lens of environmental Kuznets curve. *Energy*, 126802. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126802>
- Bekun, F. V., Gyamfi, B. A., Etokakpan, M. U., & Çakir, B. (2023). Revisiting the pollution haven hypothesis within the context of the environmental Kuznets curve. *International Journal of Energy Sector Management*, 17(6), 1210-1231. <https://doi.org/10.1108/IJESM-12-2020-0013>
- Bekun, F. V., Gyamfi, B. A., Onifade, S. T., & Agboola, M. O. (2021). Beyond the environmental Kuznets Curve in E7 economies: accounting for the combined impacts of institutional quality and renewables. *Journal of Cleaner Production*, 314, 127924. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127924>
- Boamah, K. B., Du, J., Bediako, I. A., Boamah, A. J., Abdul-Rasheed, A. A., & Owusu, S. M. (2017). Carbon dioxide emission and economic growth of China—the role of international trade. *Environmental Science and Pollution Research*, p. 24, 13049-13067. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8955-z>
- Bulut, U. (2019). Testing environmental Kuznets curve for the USA under a regime shift: the role of renewable energy. *Environmental Science Pollution Research* 26, 14562-14569. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04835-6>
- Cetin, M. A., Bakirtas, I., & Yildiz, N. (2022). Does agriculture-induced environmental Kuznets curve exist in developing countries? *Environmental Science and Pollution Research*, 29(23), 34019-34037. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18065-2>
- Chu, L.K. (2021) Estructura económica e hipótesis de la curva de Kuznets ambiental: nueva evidencia de la complejidad económica. *Applied Economics Letters*, 28(7):612-616. <https://doi.org/10.1080/13504851.2020.1767280>
- Chen, T. H., Chang, H. W., Mikhaylov, A., & Chang, T. (2024). Revisit energy consumption, economic growth and carbon dioxide emissions links in transition countries using a new developed Quantile\_on\_Quantile approach. *Applied Economics*, 1-17. <https://doi-org.basesuas.idm.oclc.org/10.1080/00036846.2024.2305611>
- Çobanoğulları, G. (2024). Exploring the link between CO<sub>2</sub> emissions, health expenditure, and economic growth in Türkiye: evidence from the ARDL model. *Environment, Development and Sustainability*, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04835-8>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2023). Emisiones de dióxido de carbono. US EPA. <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono>
- Fakher, H. A., Ahmed, Z., Acheampong, A. O., & Nathaniel, S. P. (2023). Renewable energy, nonrenewable energy, and environmental quality nexus: An investigation of the N-shaped Environmental Kuznets Curve based on six environmental indicators. *Energy*, 263, 125660. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125660>
- Fang, D., Hao, P., Wang, Z., and Hao, J. (2019). Analysis of the Influence Mechanism of CO<sub>2</sub> Emissions and Verification of the Environmental Kuznets Curve in China. *Ijerp* 16 (6), 944. <https://doi.org/10.3390/ijerp16060944>
- Gill, A. R., Viswanathan, K. K., & Hassan, S. (2018). The Environmental Kuznets Curve (EKC) and the



- environmental problem of the day. *Renewable and sustainable energy reviews*, 81, 1636-1642. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.247>
- Grossman G. M. y Krueger A. B. (1995). Environmental impacts of a North American Free Trade Agreement. In: *The U. S. Mexico free trade agreement*. (P. Garber, Ed.). MIT Press. Cambridge, MA, EUA, pp. 72-75. <https://doi.org/10.3386/w3914>.
- Gujarati, D. & Porter, D. (2010). *Econometría* (5a.ed.). México: McGraw Hill.
- Haider, A., Rankaduwa, W., ul Husnain, M. I., & Shaheen, F. (2022). Nexus between agricultural land use, economic growth and N<sub>2</sub>O emissions in Canada: Is there an environmental Kuznets curve? *Sustainability*, 14(14), 8806. <https://doi.org/10.3390/su14148806>
- Huh, T. (2020). Comparative and Relational Trajectory of Economic Growth and Greenhouse Gas Emission: Coupled or Decoupled? *Energies*, 13(10), 2550. <https://doi.org/10.3390/en13102550>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2023). Producto Interno Bruto per cápita. Cuéntame, INEGI. <https://cuentame.inegi.org.mx/economia/pibpc.aspx?tema=e>
- Kan, S., Chen, B., & Chen, G. (2019). Worldwide energy use across global supply chains: decoupled from economic growth? *Applied Energy*, 250, 1235-1245. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.104>
- Khan, A. M., Basit, A., Khan, U., & Khan, M. K. (2022). The Progressive Correlation Between Carbon Emission, Economic Growth, Energy Use, and Oil Consumption by the Most Prominent Contributors to Travel and Tourism GDPs. *Frontiers in Environmental Science*, 1023. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.945648>
- Kuznets S (1955) Economic growth and income inequality. *American Economic Review* 45(1):1-28.
- Leal Filho, W., Ng, A. W., Sharifi, A., Janová, J., Özuyar, P. G., Hemani, C., ... & Rampasso, I. (2023). Global tourism, climate change and energy sustainability: assessing carbon reduction mitigating measures from the aviation industry. *Sustainability science*, 18(2), 983-996. <https://doi.org/10.1007/s11625-022-01207-x>
- Li, X., Tang, J., Li, W., Si, Q., Guo, X., & Niu, L. (2023). A bibliometric analysis and visualization of aviation carbon emissions studies. *Sustainability*, 15(5), 4644. <https://doi.org/10.3390/su15054644>
- Li, X., Yan, X., An, Q. et al. (2016). The coordination between China's economic growth and environmental emission from the Environmental Kuznets Curve viewpoint. *Natural Hazards*, 83, 233-252. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2314-0>
- Lv, Z., Chu, A. M., McAleer, M., and Wong, W.-K. (2019). Modelling Economic Growth, Carbon Emissions, and Fossil Fuel Consumption in China: Cointegration and Multivariate Causality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16 (21), 4176. <https://doi.org/10.3390/ijerph16214176>
- Massagony, A., & Budiono. (2022). Is the Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis valid on CO<sub>2</sub> emissions in Indonesia? *International Journal of Environmental Studies*, 1-12. <https://doi.org/10.1080/0207233.2022.2029097>
- Magazzino, C., Gallegati, M., & Giri, F. (2023). The Environmental Kuznets Curve in a long-term perspective: Parametric vs semi-parametric models. *Environmental Impact Assessment Review*, 98, 106973. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106973>
- Mehmood, S., Zaman, K., Khan, S., & Ali, Z. (2024). The role of green industrial transformation in mitigating carbon emissions: Exploring the channels of technological innovation and environmental regulation. *Energy and Built Environment*, 5(3), 464-479. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.03.001>
- Naseem, S., Hu, X., Sarfraz, M., & Mohsin, M. (2024). Strategic assessment of energy resources, economic growth, and CO<sub>2</sub> emissions in G-20 countries for a sustainable future. *Energy Strategy Reviews*, 52, 101301. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101301>
- Nawapanan, E., Kongboon, R., & Sampattagul, S. (2022). Green GDP Indicator with Application to Life Cycle of Sugar Industry in Thailand. *Sustainability*, 14(2), 918. <https://doi.org/10.3390/su14020918>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD). (2020). Ingresos fiscales. Recuperado de <https://www.oecd.org/espanol/estadisticas/ingresos-fiscales.htm>
- Ortiz-Paniagua, C. F., & Gómez, M. (2021). Crecimiento económico y calidad ambiental en América Latina, perspectiva desde Kuznets, 1970-2016. *Economía: teoría y práctica*, (55), 17-36. <http://dx.doi.org/10.24275/ETYP/AM/NE/552021/Ortiz>
- Pinilla-Rivera, M., Díaz-Rodríguez, C. y Sánchez-Buendía, E. E. (2018). Crecimiento económico y emisiones de CO<sub>2</sub> en América Latina, 1990-2015. *Semestre Económico*, 21(49), 41-55.
- Pradhan, K.C., Mishra, B., & Mohapatra, S.M. (2024). Investigating the relationship between economic growth, energy consumption, and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions: a comparative analysis of South Asian nations and G-7 countries. *Clean Technologies Environmental Policy*. <https://doi-org.basesuas.idm.oclc.org/10.1007/s10098-024-02802-5>
- Qin, J., Duan, W., Zou, S., Chen, Y., Huang, W., & Rosa, L. (2024). Global energy use and carbon emissions from irrigated agriculture. *Nature Communications*, 15(1), 3084. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47383-5>



- Ramzan, M., Raza, S. A., Usman, M., Sharma, G. D., & Iqbal, H. A. (2022). Environmental cost of non-renewable energy and economic progress: Do ICT and financial development mitigate some burden?. *Journal of Cleaner Production*, 333, 130066. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130066>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2023). Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave de desempeño ambiental y de crecimiento verde.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2016). Importancia relativa del comercio exterior. Recuperado de [https://apps.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores\\_verdes16/indicadores/archivos/pdf/01\\_contexto/metadatos/V\\_CSE\\_2.2.3\\_met.pdf](https://apps.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores_verdes16/indicadores/archivos/pdf/01_contexto/metadatos/V_CSE_2.2.3_met.pdf)
- Sun, X., Ping, Z. B., Dong, Z. F., Chen, K. L., Zhu, X. D., Li, B. L., ... & Xiong, W. (2021). Resources and environmental costs of China's rapid economic growth: From the latest theoretic SEEA framework to modeling practice. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128126. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128126>
- Taghvaei, V.M., Nodehi, M. & Saboori, B. (2022). Economic complexity and CO<sub>2</sub> emissions in OECD countries: sector-wise Environmental Kuznets Curve hypothesis. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21491-5>
- Ullah, I., Rehman, A., Svobodova, L., Akbar, A., Shah, M. H., Zeeshan, M., & Rehman, M. A. (2022). Investigating Relationships Between Tourism, Economic Growth, and CO<sub>2</sub> Emissions in Brazil: An Application of the Nonlinear ARDL Approach. *Frontiers in Environmental Science*, 52. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.843906>
- Vadén, T., V. Lähde, A. Majava, P. Järvensivu, T. Toivanen, E. Hakalay Eronen, J. (2020). Decoupling for ecological sustainability: A categorization and review of research literature, *Environmental Science & Policy*, 112: 236–244. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.06.016>
- Vallés-Giménez, J., & Zárata-Marco, A. (2021). A spatial dynamic model for export intensity of hazardous industrial waste: the incentive effect of regional environmental policies. *Environmental and Resource Economics*, 80(4), 859-888. <https://doi.org/10.1007/s10640-021-00612-7>
- Wang, Q., & Jiang, R. (2020). Is carbon emission growth decoupled from economic growth in emerging countries? New insights from labor and investment effects. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119188. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119188>
- Wang, Q., & Jiang, R. (2019). Is China's economic growth decoupled from carbon emissions? *Journal of Cleaner Production*, 225, 1194-1208. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.301>
- Wang, Q., Yang, T., & Li, R. (2023). Does income inequality reshape the environmental Kuznets curve (EKC) hypothesis? A nonlinear panel data analysis. *Environmental Research*, 216, 114575. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114575>
- Wang, Q., Zhang, F., & Li, R. (2023a). Revisiting the environmental Kuznets curve hypothesis in 208 countries: The roles of trade openness, human capital, renewable energy, and natural resource rent. *Environmental Research*, 216, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114637>
- Yang, G., Sun, T., Wang, J., and Li, X. (2015). Modeling the Nexus between Carbon Dioxide Emissions and Economic Growth. *Energy Policy* 86, 104–117. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.06.031>
- Zeraibi, A., Radulescu, M., Khan, M. K., Hafeez, M., & Jahanger, A. (2023). Analyzing the linkage between public debt, renewable electricity output, and CO<sub>2</sub> emissions in emerging economies: Does the N-shaped environmental Kuznets curve exist?. *Energy & Environment*, 1-24. <https://doi.org/10.1177/0958305X231151678>
- Zuhal, M., & Göcen, S. (2024). The relationship between CO<sub>2</sub> emissions, renewable energy, and economic growth in the US: evidence from symmetric and asymmetric spectral Granger causality analysis. *Environment, Development and Sustainability*, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05002-9>

