

## Desempeño de la Curva Ambiental de Kuznets y la huella ecológica en los países del G7, BRICS y México, 1990-2022.

Environmental Kuznets Curve and the Ecological Footprint performances in the G7, BRICS countries and Mexico, 1990-2022.

Enrique Guardado Ibarra<sup>1</sup>

Felipe Cruz Díaz<sup>2</sup>

### Resumen

En los últimos años, las causas y soluciones de la degradación ambiental se han convertido en tema de discusión en diversos organismos internacionales y economías alrededor del mundo. La presente investigación analiza la Curva Ambiental de Kuznets (CAK) para los países miembros del G7, BRICS y México en el periodo de 1990 al 2022. Para medir la degradación ambiental durante el periodo señalado en los presentes países se utiliza la huella ecológica. En el planteamiento metodológico se utilizan pruebas econométricas de datos de panel, como es el caso de las pruebas de dependencia de sección cruzada, de raíz unitaria, de cointegración y de causalidad. De igual manera se aplican los estimadores FMOLS y el Método de Regresión Cuantil de Momentos. Los resultados obtenidos confirman la hipótesis de la CAK para los países estudiados. El coeficiente obtenido de las energías renovables es negativo y significativo mientras que las patentes y la apertura comercial tienen un coeficiente positivo y significativo respecto a la huella ecológica.

**Palabras clave:** Curva Ambiental de Kuznets, huella ecológica, energías renovables, FMOLS, regresión cuantil.

**Clasificación JEL:** Q51, Q53, Q56

### Abstract

In recent years, the causes and solutions to environmental degradation have become a topic of discussion in various international organizations and economies around the world. This research analyzes the Environmental Kuznets Curve (ECC) for the G7, BRICS, and Mexico member countries from 1990 to 2022. The ecological footprint is used to measure environmental degradation during the indicated period in these countries. The

<sup>1</sup> Profesor - Investigador del Área Académica de Comercio Exterior, Instituto de Ciencias Económico y Administrativas de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. [enrique\\_guardado@uaeh.edu.mx](mailto:enrique_guardado@uaeh.edu.mx) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7329-9811>

<sup>2</sup> Profesor - Investigador de la Universidad Autónoma de México - FES Acatlán. (Autor por correspondencia) [uim@acatlan.unam.mx](mailto:uim@acatlan.unam.mx) ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-0600-6940>

methodological approach employs panel data econometric tests, such as cross-sectional dependence, unit root, cointegration, and causality tests. FMOLS and the Quantile Moment Regression Method are also applied. The results confirm the ECC hypothesis for the countries studied. The coefficient obtained for renewable energy is negative and significant, while patents and trade openness have a positive and significant coefficient on the ecological footprint.

**Keywords:** Environmental Kuznets Curve, Ecological Footprint, renewables energies, FMOLS, Quantile Regression.

## 1. Introducción

A través de los años, el crecimiento económico ha sido uno de los temas fundamentales en las agendas de prácticamente todos los países en el mundo. En décadas pasadas, no era relevante si este crecimiento económico venía de la mano con la contaminación medioambiental, sin embargo, actualmente, existe una gran preocupación sobre cómo alcanzar niveles de crecimiento económico sin afectar al medio ambiente o bien, disminuir la degradación del mismo lo mayor posible.

Esta necesidad de crecimiento y desarrollo sin afectar al medio ambiente o bien, reducir sus niveles de degradación cobra mayor relevancia en los países que tienen una gran influencia económica y alto consumo de energías, tal es el caso de los países pertenecientes al G7 (Alemania, Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia, Japón y Reino Unido), como los países pertenecientes a las BRICS (Brasil, Rusia, India, China y Sudáfrica) y México. En términos de energía consumida, el G7 demanda el 30% del total de energía que se produce en el mundo, esto se ve reflejado en las emisiones de CO<sub>2</sub>, la cual representa un 25% de las emisiones totales mundiales (IEA, 2022). las BRICS por su parte, demandan el 40% de la energía total del mundo, lo cual se ve reflejado en un 40% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> a nivel global (Samour *et al.*, 2023). México, por su parte, es un país con una gran influencia en Latinoamérica, así como de igual manera destaca por tener una gran relación comercial con Estados Unidos. México tiene un consumo nacional de 10,370.3 PJ (Petajoules) (Secretaría de Energía [SENER], 2021). En términos de emisiones de CO<sub>2</sub>, México produce 383, 131 Kt (kilotons) (BM, 2022).

Recientemente, diversas investigaciones han surgido a partir de la necesidad de estudiar la relación entre crecimiento económico y la reducción de la degradación del medio ambiente desde una visión económica. Uno de estos ejemplos es la relación entre el crecimiento económico y el medio ambiente a través de la Curva Ambiental de Kuznets. Panayotou (1993) fue uno de los primeros investigadores en realizar estudios en donde se puso a prueba la hipótesis de una relación en forma de U invertida entre la degradación ambiental y el desarrollo económico. Con datos transversales, sus resultados respaldaron la hipótesis de una U invertida para una muestra de países desarrollados y en desarrollo a la que llamó Curva Ambiental de Kuznets (Gómez y Rodríguez, 2020). Diversos autores han logrado validar la hipótesis de la CAK bajo diversas condiciones en su forma básica (Stern *et al.*, 2001; Friedl *et al.* 2003, Dinda, 2010) mientras que existen por lado investigaciones en donde la hipótesis no es concluyente (Jie, 2010; Fallahi, 2011; Yang, *et al.*, 2014).

Las emisiones de dióxido de carbono se utilizan ampliamente en la literatura existente como una variable que mide la degradación ambiental. Sin embargo, una de las variables alternativas introducidas recientemente en algunos estudios (Altıntaş y Kassouri, 2020; Charfeddine y Mrabet, 2017; Dogan *et al.*,

2020 y Gómez y Rodríguez, 2020) es la huella ecológica per cápita, que tiene la ventaja de cubrir diversos aspectos de la degradación ambiental como la huella de tierras agrícolas, la huella de carbono, la huella de tierras de pastoreo, etc., a diferencia de los gases de efecto invernadero convencionales (Altintas y Kassouri, 2020). El indicador de emisiones de dióxido de carbono no considera la naturaleza compleja de la degradación ambiental, mientras que la huella ecológica es más apropiada porque rastrea el uso de múltiples categorías de superficies productivas (Charfeddine y Mrabet, 2017). La huella ecológica estima la cantidad de capital natural necesaria para sostener la demanda de recursos y los requisitos de absorción de desechos en hectáreas globales o hectáreas de bioproductividad globalmente estandarizada (Dogan *et al.*, 2020). Por lo anterior, la huella ecológica será considerada dentro del análisis de la Curva Ambiental de Kuznets.

Para llevar a cabo la validación de la Curva Ambiental de Kuznets en los tiempos actuales, es importante incluir variables que permitan explicar en mejor medida el desempeño de la curva. Es por ello que se incorpora, a través de la validación empírica el consumo de energías renovables, en donde se ha demostrado que el incremento de este tipo de energías puede llegar a reducir el consumo de energías fósiles que generan emisiones de CO<sub>2</sub> (Liu, Zhang y Bae, 2017; Gómez y Rodríguez, 2020; Guardado y Cruz, 2024). Otra variable importante a considerar es el desarrollo de patentes, ya que, por medio de estas, se generan ventajas en términos de avances tecnológicos los cuales en cierta medida favorecen en la transición del mejoramiento de la degradación ambiental reduciendo la contaminación, sin embargo, existe otra postura en donde está en lugar de beneficiar a la degradación ambiental, la favorece (Acs, Anselin y Varga, 2002; Popp, 2005; Youssef, 2020). De igual manera, es importante considerar la variable de apertura comercial, ya que esta variable puede jugar un papel ya sea positivo o bien negativo respecto a desempeño de la degradación ambiental (Dinda, 2004; Churhill, et al., 2018 y Gómez y Rodríguez, 2020).

Por lo anterior, el presente artículo tiene por objetivo estudiar la relación entre el crecimiento económico, consumo de energías renovables, acuerdos comerciales, patentes creadas y la degradación ambiental medida a través de la huella ecológica para los países del G7, BRICS y México durante el periodo 1990-2022 a través de un análisis econométrico de datos panel. La presente investigación se estructura de la siguiente manera: posterior a la introducción, se encuentra una breve revisión teórica sobre la hipótesis de la CAK, en la tercera sección se encuentra el planteamiento y desarrollo del modelo econométrico, en la cuarta sección los resultados y sus interpretaciones y finalmente las conclusiones derivadas del desarrollo del trabajo.

## **2. Análisis teórico**

La interacción entre el medio ambiente y la economía ha sido un tema discutido y estudiado por grandes personajes históricos en el ámbito económico como los son, por ejemplo, Malthus, Marx, Jevons, entre otros (Ortíz-Paniagua y Gómez, 2021). Sin embargo, estas discusiones no habrían tenido tanto impacto debido al poco interés en general de las economías dominantes en sus respectivos periodos de tiempo sobre las expectativas del comportamiento del medio ambiente y su propia evolución a través del crecimiento económico. No fue sino hasta el siglo XX a mediados de los setentas donde, de acuerdo con Meadows *et al.* (1972) y Mesarovic y Pestel (1975), esta relación cobró verdadera importancia basándose en tres problemas fundamentales a resolver: el primero, la degradación de los recursos naturales en términos de calidad y cantidad, el segundo, basado en la creciente demanda de energéticos, alimentos e insumos y el tercero, el incremento en la inequidad de la distribución del ingreso. Dichos problemas siguen estando vigentes en el presente.

Para analizar teóricamente la relación medio ambiental y el crecimiento económico se plantea, por lo tanto, la Curva Ambiental de Kuznets. La hipótesis ambiental de la Curva de Kuznets postula una relación en forma de U invertida entre diferentes contaminantes y el ingreso per cápita (Dinda, 2004). El desarrollo económico se puede dividir en tres etapas: efecto de escala, efecto de composición y efecto técnico. En la primera etapa del desarrollo económico o “efecto de escala”, los aumentos en la producción provocan aumentos en la degradación ambiental, por lo tanto, el crecimiento económico incrementa la degradación ambiental, a este tipo de economías se les denomina economías preindustriales. Dentro de la segunda etapa del desarrollo económico o “efecto composición”, el crecimiento económico continúa en un inicio de la mano con el incremento de la contaminación cuando la estructura económica cambia de la agricultura a las industrias manufactureras con mayor uso intensivo de energía; esta tendencia positiva se mantiene hasta que la estructura de la economía cambie hacia el sector de servicios y a las industrias manufactureras ligeras, por lo tanto, en esta etapa, un mayor crecimiento económico podría reducir la contaminación ambiental (economías industriales). En la tercera y última etapa, también conocida como “efecto técnico”, las mejoras en la productividad y la adaptación de tecnologías más limpias, junto con una mayor conciencia, gasto ambiental y la aplicación de regulaciones ambientales, reducirán gradualmente la contaminación y por ende la degradación ambiental (economía de servicios) (Panayotou, 1993; Bekhet y Othman, 2018; Álvarez-Herránz *et al.*, 2017 y Lin *et al.*, 2016).

Al aplicar la hipótesis de la curva ambiental de Kuznets, se identifica que en las primeras etapas del desarrollo económico, la presión y daño ambiental aumenta más rápido que los ingresos derivado de un mayor uso de los recursos naturales y a una mayor emisión de contaminantes generadores de gases de efecto invernadero, de igual manera la población no cuenta con los suficientes ingresos como para pagar por su reducción de esos gases o bien, le es indiferente el problema de la degradación ambiental. Una vez que se empiezan a tener niveles más altos de crecimiento económico y un mayor ingreso per cápita, la gente empieza a valorar la importancia de cuidar el medio ambiente y las instituciones regulatorias empiezan a funcionar de una manera eficiente; por lo tanto, los niveles de contaminación disminuyen y a su vez, la degradación ambiental (Dinda, 2004).

El siguiente modelo (1) se puede utilizar para probar la hipótesis de la curva ambiental de Kuznets:

$$pt = \beta_1 i + \beta_2 yt + \beta_3 y2t + \beta_4 y3t + \beta_5 zt + eit \quad (1)$$

donde  $p$  representa el indicador de degradación ambiental,  $y$  es el nivel de ingreso y  $z$  son otras variables que pueden influir en el medio ambiente. La relación entre el medio ambiente y el crecimiento y desarrollo económico se puede probar con la ecuación anterior, y la hipótesis de la curva de Kuznets se cumple cuando:

$$\beta_2 > \beta_3 < 0 \text{ y } \beta_4 = 0 \quad (2)$$

A partir de la hipótesis de la Curva Ambiental de Kuznets, teóricamente se puede deducir que entre más ingresos económicos per cápita tenga una economía, se llegará a un punto en el que la contaminación y degradación ambiental tenderá a disminuir derivado de distintas circunstancias como políticas más limpias en los sistemas de producción, mayor conciencia por parte de la población, mejores condiciones de vida, etc. (Beckerman, 1992; Panayotou, 1993; Dinda, 2004 y Zilio, 2012).

### 3. Desarrollo del modelo

Para la presente investigación se plantea la hipótesis de la Curva Ambiental de Kuznets. Para llevarlo a cabo, se utilizaron datos anuales expresados en logaritmos naturales de los países pertenecientes al G7, BRICS y México del periodo de 1990 al 2022. Las variables se encuentran caracterizada de la siguiente manera:

- Huella Ecológica (HE): Medida en hectáreas globales. Los datos fueron obtenidos del Global Footprint Network (2025).
- Producto Interno Bruto Per Cápita (PIB): Medido en precios en dólares constantes 2015. Datos obtenidos del Banco Mundial (2025).
- Energías Renovables (ER): Medido en miles de Toe (tonelada equivalente de petróleo). Datos obtenidos de la OCDE (2025).
- Patentes aplicadas (PAT): Medidas en el total de patentes aplicadas. Datos obtenidos del Banco Mundial (2025).
- Apertura Comercial (AC): Medidas como las exportaciones más importaciones dividido entre el PIB. Datos obtenidos del Banco Mundial (2025).

Por lo anterior, se presenta el modelo propuesto para validar la Curva ambiental de Kuznets:

$$HE_{it} = \beta_0 i + \beta_1 i ER_{it} + \beta_2 i PIB_{it} + \beta_3 i PIB_{2it} + \beta_4 i PAT_{it} + \beta_5 i AC_{it} + e_{it} \quad (3)$$

En donde  $i$  representa el corte transversal referenciando a los países,  $t$  identifica al periodo de tiempo establecido, y señala el término de error. Los parámetros  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ ,  $\beta_4$  y  $\beta_5$  representan la elasticidad existente en el largo plazo de las variables de estudio. Se espera que el comportamiento de las variables de estudio sea el siguiente:

- $\beta_1 < 0$  un incremento de ER genera una disminución de HE.
- $\beta_2 > 0$  ya que un incremento del PIB, de acuerdo a la hipótesis de la Curva Ambiental de Kuznets, en un inicio genera un incremento de HE.
- $\beta_3 < 0$  ya que un incremento de PIB<sup>2</sup>, de acuerdo al comportamiento de la U invertida de la Hipótesis de la CAK genera una disminución en HE.
- $\beta_4 > 0$  o  $< 0$ . Puede ser positivo o negativo, ya que la generación de patentes se relaciona con el desarrollo tecnológico, lo cual fomenta la reducción de la contaminación (Cheng, Ren y Wang, 2019), sin embargo, también podrían afectar favoreciendo el incremento de emisiones de CO<sub>2</sub> derivado de un mal manejo de políticas que faciliten la absorción tecnológica (Sweet and Eterovic, 2019; Cheng, Ren y Wang, 2019 y Ben Youssef, 2020).
- $\beta_5 > 0$  o  $< 0$  Puede ser positivo o negativo, ya que la apertura comercial, de acuerdo con Dinda (2004) y Gómez y Rodríguez (2020) puede aumentar la degradación ambiental debido a un aumento en la producción, por un aumento de las actividades del mercado y por una mayor apertura para el acceso a bienes y servicios. Sin embargo, esta puede disminuir la contaminación cuando se tiene acceso a tecnologías de producción respetuosas con el medio ambiente (Reppel-Hill, 1999; Gómez y Rodríguez, 2019).

Dentro de la literatura econométrica basada en panel de datos se recomienda llevar a cabo pruebas de dependencia de sección cruzada con la finalidad de descartar la existencia de dependencia entre las variables

a lo largo del tiempo. La presente investigación en este sentido, aplica las pruebas de Pesaran CD, Breusch-Pagan LM y Bias-corrected scaled LM) (Baltagi y Pesaran 2007). Para un adecuado análisis de cointegración en un panel de datos, se aplica el estimador de Mínimos Cuadrados Completamente Modificados (FMOLS por sus siglas en inglés). Este estimador puede generar estimaciones consistentes en pequeñas muestras y mantener un control en términos de heterogeneidad y una correlación serial en paneles de datos no estacionarios (Pedroni 2004).

De manera complementaria, para generar una mayor robustez en el comportamiento de las variables y sus coeficientes en el largo plazo, la presente investigación aplica el Método de Regresión Cuantil de Momentos. Cheng, Ren y Wang (2019) y Allard *et al.* (2017) señalan que este método tiende a ser más eficiente que el método de mínimos cuadrados, esto debido a que considera la heterogeneidad tanto de manera individual como de manera distributiva, proporcionando una mayor información entre las variables de estudio.

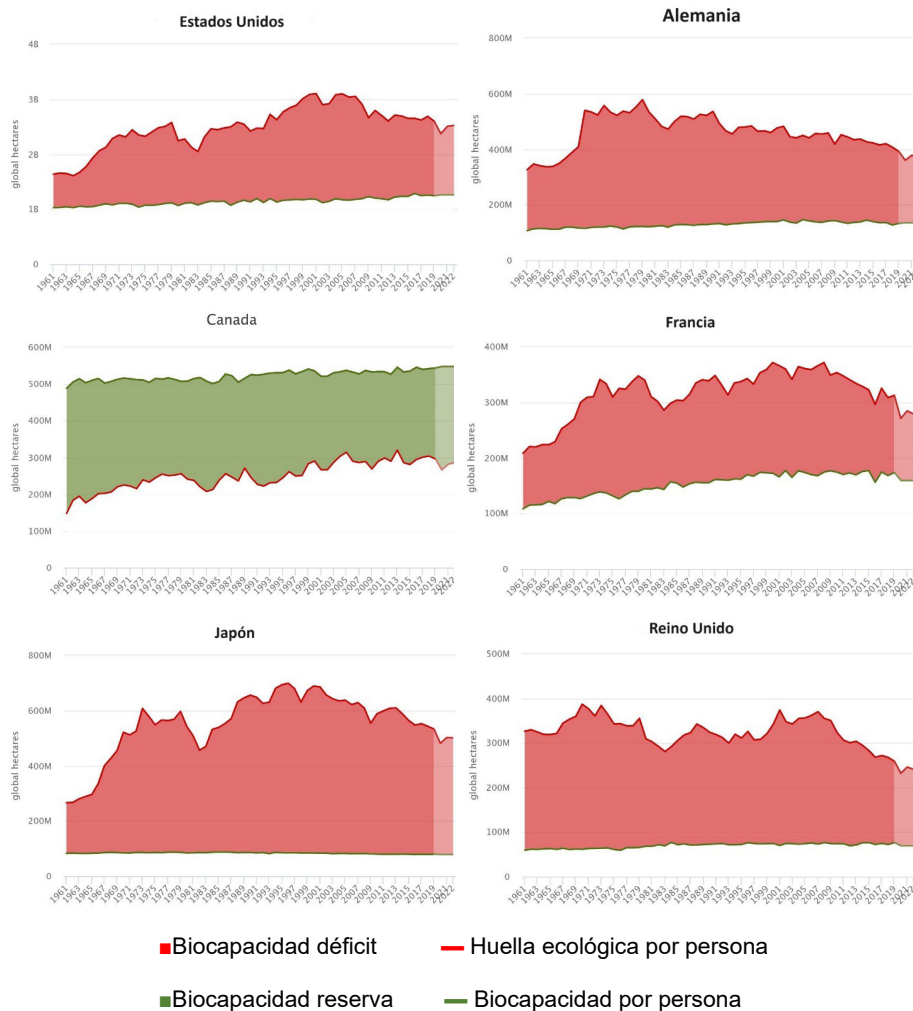
Finalmente, el presente estudio incorpora un análisis de causalidad que permite estudiar la relación existente entre las variables en el desarrollo de modelos de panel de datos (Dumitrescu y Hurlin, 2012). Esta relación existente puede ser bidireccional (una relación en ambos sentidos) o bien, una relación unidireccional (relación de un solo sentido).

#### 4. Resultados

En el presente apartado se muestran y analizan los resultados obtenidos a partir del análisis del comportamiento de la Curva Ambiental de Kuznets. En primera instancia, se observa el desempeño a través del tiempo de la huella ecológica de los países analizados. La gráfica 1 muestra el comportamiento de los países pertenecientes al G7.

Gráfica 1.

Desempeño de la huella ecológica de los países del G7  
(Hectáreas globales por persona)



Fuente: National Footprint and Biocapacity accounts, 2025.

Como se puede observar en la gráfica 1, Alemania, Estados Unidos, Francia, Japón y Reino Unido presentan una huella ecológica mayor a su Biocapacidad per cápita durante el periodo desde 1961 al 2022. Esto se traduce en que estos países presentan un déficit ecológico. Solo Reino Unido presenta una tendencia a la baja a lo largo del periodo. Para el caso de Canadá, por el contrario, su huella ecológica es inferior a su Biocapacidad per cápita, por lo que no presenta un déficit ecológico, sin embargo, a lo largo del periodo señalado, esta brecha de reserva tiene una tendencia a disminuir.

Este comportamiento se puede explicar por el grado de industrialización que tienen estos países al ser potencias económicas y el grado de concentración de población que tienen por kilómetro cuadrado. Para el caso de Canadá, se explica derivado de que cuenta con un territorio muy extenso y su densidad de población es baja por kilómetro cuadrado.

La gráfica 2 muestra el comportamiento de los países pertenecientes a los BRICS incluyendo a México.

Gráfica 2.

Desempeño de la huella ecológica de los países de los BRICS y México  
(Hectáreas globales por persona)



Fuente: National Footprint and Biocapacity accounts, 2025.



Como se puede observar en la gráfica 2, China, India y Sudáfrica presentan una huella ecológica mayor a su Biocapacidad per cápita durante el periodo señalado. Esto se traduce en que estos países presentan un déficit ecológico muy marcado. Cabe destacar que estos tres países tienen una tendencia al alza muy marcada a lo largo del periodo a partir de finales de los 90s. Para el caso de Brasil y Rusia, por el contrario, su huella ecológica es inferior a su Biocapacidad per cápita, por lo que no presentan un déficit ecológico, sin embargo, a lo largo del periodo señalado, esta brecha de reserva tiene una tendencia a disminuir para el caso de Brasil. Para el caso de México, se observa que la huella ecológica superó la Biocapacidad per cápita a mediados de la década de los 70s, a partir de esa década, se muestra un déficit ecológico creciente con una tendencia a la baja a partir del año 2013.

Este comportamiento en primera instancia de China, India y en menor medida Sudáfrica se explica por un proceso de industrialización intensivo y de expansión internacional que vivió a principios de los años 90s. De igual manera, este comportamiento de déficit ecológico está altamente relacionado con la densidad de población por kilómetro cuadrado en cada país, siendo el caso de China e India los países con mayor población a nivel mundial.

Una vez analizado el desempeño de la huella ecológica en los países seleccionados, se procede a realizar el análisis mediante la aplicación del modelo econométrico a través del método de datos de panel balanceado. Como se muestra en la tabla 1 a continuación, se debe de validar en primera instancia si existe dependencia de sección cruzada en las variables seleccionadas.

**Tabla 1.**

Prueba de dependencia de sección cruzada

Variable	HE	PIB	PIB2	AC	ER	PAT
<b>Breusch-Pagan LM</b>	831.037***	1803.072***	1726.954***	2027.957***	1349.672***	893.352***
<b>Pesaran scaled LM</b>	60.081***	138.116***	132.022***	156.121***	101.815***	65.280***
<b>Bias-corrected</b>	60.291***	137.906***	131.812***	155.911***	101.605***	65.070***
<b>Pesaran CD</b>	5.799***	41.523***	40.397***	44.837***	19.335***	11.967***

Nota: \*\*\* denota un rechazo de la hipótesis nula al 1% en los niveles, respectivamente.

Fuente: Elaboración propia, con tratamiento en Eviews 12.

De acuerdo con la tabla 1, se aplican cuatro pruebas para el análisis de sección cruzada, la prueba de Breush-Pagan LM, Pesaran scaled LM, Bias-corrected y Pesaran CD. Los resultados arrojan un rechazo de la hipótesis nula de no dependencia en todas las pruebas al 1% para todas las variables.

De acuerdo a los resultados obtenidos, es necesario llevar a cabo pruebas de raíz unitaria para generar resultados consistentes ante la presencia de una dependencia de sección cruzada en el panel de datos, estas pruebas se muestran en la tabla 2 a continuación:

Tabla 2.

Resultados de la prueba de raíz unitaria con datos panel

Variable	Parámetros determinísticos	IPS	ADF-FISHER	PP FISHER	PESCADF
HE	CT	0.840	26.304	44.385	0.605
PIB	CT	0.597	29.388	21.148	-2.165555
PIB2	CT				
PAT	CT	0.470	25.308	16.274	-0.993
AC	CT	0.436	22.477	24.723	-2.691111
ER	CT	4.351	11.757	11.521	3.753
<b>Primeras diferencias</b>					
$\Delta$ HE***	C	-10.209	148.739	283.496	-7.946
$\Delta$ PIB***	C	-7.738	113.833	247.332	-4.606
$\Delta$ PIB2***	C				
$\Delta$ PAT***	C	-8.649	129.152	195.265	-7.521
$\Delta$ AC***	C	-10.433	152.469	269.435	-6.288
$\Delta$ ER***	C	-5.098	88.952	171.715	-5.092

Nota: \*\*\* denota un rechazo de la hipótesis nula al 1% en los niveles, respectivamente

Fuente: Elaboración propia, con tratamiento en Eviews 12 y STATA 16.

Como se puede observar en la tabla 2, se aplicaron 2 tipos de pruebas de raíz unitaria para datos de panel, de primera y de segunda generación. Las pruebas de primera generación realizadas fueron de Levin, Lin y Chu (2002); Im, Pesaran y Shin (2003); Fisher a través del ADF y la prueba de PP-fisher (1994 y 2001). Para la prueba de segunda generación se aplicó el método de Pesaran a través del PESCADF (2007). Los resultados obtenidos de estas pruebas muestran que todas las variables tienen raíz unitaria en sus niveles y son estacionarias cuando se encuentran en primeras diferencias, rechazando para este caso, la hipótesis nula de raíz unitaria con un nivel de significancia del 1% en todas las pruebas.

Una vez realizadas las pruebas de raíz unitaria, es importante identificar si existe una relación de equilibrio de largo plazo entre las variables. Para esto, se aplican tres diferentes pruebas de cointegración, la prueba de Pedroni (1999), la prueba de Johansen-Fisher (1999) y la prueba de Westerlund (2007). La tabla 3 muestra la primera prueba señalada para identificar la relación de equilibrio de largo plazo.

Tabla 3.

Resultados de la prueba de cointegración de Pedroni

Test	Estadístico	Prob.
Panel v	0.834	0.202
Panel rho	-0.862	0.194
Panel PP	-5.197***	0.000
Panel ADF	-3.859***	0.000
Group rho	0.147	0.558

<b>Group PP</b>	-5.802***	0.000
<b>Group ADF</b>	-3.668***	0.000

Nota: \*\*\* denota un rechazo de la hipótesis nula al 1%, respectivamente. Fuente: Elaboración propia, con tratamiento en Eviews 12

La tabla 3 muestra los resultados obtenidos respecto la cointegración en el largo plazo de las variables mediante la prueba de Pedroni. Se determina que la hipótesis nula de no cointegración se rechaza cuando incluye la constante mediante la validación de los estadísticos de panel PP, ADF, grupo PP y grupo ADF a un nivel de significancia del 1% para todas.

**Tabla 4.**

Resultados de la prueba de cointegración de Johansen-Fisher

<b>Test</b>	<b>Estadístico</b>	<b>Prob.</b>
<b>R = 0</b>	243.7***	127.3***
<b>R ≥ 1</b>	146.3***	82.38***
<b>R ≥ 2</b>	86.36***	55.69***
<b>R ≥ 3</b>	50.24***	36.22**
<b>R ≥ 4</b>	52.01***	52.01***

Nota: \*\*\* y \*\* denotan un rechazo de la hipótesis nula al 1% y 5%, respectivamente.

Fuente: Elaboración propia, con tratamiento en Eviews 12

La tabla 4 muestra los resultados obtenidos de la prueba de cointegración de Johansen-Fisher, en donde al menos las 4 variables denotan rechazo de la hipótesis nula de no cointegración al 1%.

**Tabla 5.**

Prueba de cointegración de Westerlund

<b>Estadístico</b>	-1.5876**
<b>Prob.</b>	0.052

Nota: \*\* denota un rechazo de la hipótesis nula al 5%, respectivamente.

Fuente: Elaboración propia, con tratamiento en STATA 16

La tabla 5 muestra los resultados de la prueba de cointegración de Westerlund, la cual se utiliza cuando existe dependencia de sección cruzada. Permitiendo relajar los supuestos de independencia. La hipótesis nula de no cointegración en esta prueba por lo tanto se rechaza al 5%.

Para la prueba de estimadores dentro de un panel de datos, se utiliza el estimador FMOLS el cual es el más adecuado dadas las características de los datos. Los resultados se presentan en la tabla 6 a continuación:

Tabla 6.

## Estimación del modelo de largo plazo

Variable	Coefficientes FMOLS
PIB	81858.77***
PIB2	-1.296***
ER	-2697.203***
PAT	1785.375***
AC	5.608***

Nota: \*\*\* denota un rechazo de la hipótesis nula al 1%, respectivamente.

Fuente: Elaboración propia, con tratamiento en Eviews 12

La tabla 6 presenta los resultados obtenidos de la aplicación del estimador FMOLS. Todas las variables son estadísticamente significativas al 1% en sus respectivos niveles. Las elasticidades obtenidas en el largo plazo muestran que existe una relación positiva y significativa con el PIB en el consumo de energía renovables con respecto a la huella ecológica. EL PIB2 tiene un coeficiente negativo y significativo, esto confirma la hipótesis de la Curva Ambiental de Kuznets para los países del G7, BRICS y México donde se señala que las etapas de desarrollo económico de estos países generan una tendencia en forma de U invertida en la relación entre el crecimiento económico y la degradación del medio ambiente. De acuerdo al modelo teórico de la Curva Ambiental de Kuznets en la primera etapa “efecto de escala” y la segunda etapa “efecto de composición” tanto la variable PIB como la dependiente huella ecológica muestran una relación positiva hasta el punto en que se genera un determinado nivel de ingreso, a partir de ese momento, el comportamiento de la degradación ambiental a través de la huella ecológica tiende a disminuir.

Respecto a la variable de energías renovables, el coeficiente obtenido es de signo negativo y significativo, lo cual hace referencia a que un incremento de este tipo de energías provoca una disminución de la degradación ambiental. Para el caso de las variables patentes y apertura comercial se obtuvo que ambas tienen un coeficiente positivo y significativo lo cual hace referencia a que la generación de patentes referentes al cuidado del medio ambiente y los acuerdos establecidos en los tratados no favorecen o no son determinantes en la reducción de la huella ecológica. A manera de generar una mayor robustez en los resultados obtenidos, se aplica el Método de Regresión Cuantil de Momentos como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7.

## Resultados de la estimación cuantil de panel MMQR

Variables	Cuantiles								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
PIB	0.248**	0.285***	0.309***	0.337***	0.363***	0.388***	0.415***	0.437***	0.468***
PIB2	-6.361	-5.831**	-5.491**	-5.101***	-4.711***	-4.361**	-3.971*	-3.661	-3.211
ER	-0.164***	-0.151***	-0.143***	-0.133***	-0.123***	-0.114***	-0.105***	-0.097***	-0.086***
PAT	0.111**	0.110***	0.110***	0.109***	0.108***	0.108***	0.107***	0.106***	0.105***
AC	0.149**	0.099*	0.066	0.029	-0.006	-0.040	-0.077*	-0.107**	-0.149**

Nota: \*\*\*, \*\* y \* denotan un rechazo de la hipótesis nula al 1%, 5% y 10% en sus niveles, respectivamente.

Fuente: Elaboración propia, con tratamiento en STATA 16

Como se observa en la tabla 7 mediante la estimación cuantil de momentos se confirman todos los resultados obtenidos a través del estimador FMOLS. Por ejemplo, para el caso de las variables PIB y PIB2 estas se confirman del cuantil 2 al cuantil 7 cumpliéndose la hipótesis de la curva ambiental de Kuznets. Para el caso de las energías renovables, se confirma la relación negativa y significativa para todos los cuantiles en donde este tipo de energías juega un papel importante en la reducción de la huella ecológica. Para el caso de las patentes, se confirma su relación positiva y significativa en todos los cuantiles, esto es que, lejos de generar un beneficio para la reducción de la huella ecológica, la ha incrementado causado por la generación de patentes tecnológicas que no favorecen en la disminución de esta. Para el caso de la apertura comercial de igual manera se confirma su relación positiva y significativa para el caso del cuantil 1, 2, 7, 8 y 9. Esto significa que un incremento en la apertura comercial de estos países ha provocado un incremento de la huella ecológica en estos.

Demostrar la relación causal entre las variables estudiadas es fundamental una vez que se identifica una relación de largo plazo en estas. Para realizar esta validación, se aplica la prueba de causalidad heterogénea propuesta por Hurlin-Dumitrescu (2012) para identificar si existen relaciones causales bidireccionales o bien, unidireccionales (tabla 8).

**Tabla 8.**

Resultados de la prueba de causalidad heterogénea Hurlin-Dumitrescu

Hipótesis nula	Zbar-Stat	Decisión
PIB no causa homogéneamente a HE	6.122***	Rechazo
HE no causa homogéneamente a PIB	3.384***	Rechazo
PIB2 no causa homogéneamente a HE	6.106***	Rechazo
HE no causa homogéneamente a PIB2	4.349***	Rechazo
ER no causa homogéneamente a HE	5.450***	Rechazo
HE no causa homogéneamente a ER	3.927***	Rechazo
PAT no causa homogéneamente a HE	2.991***	Rechazo
HE no causa homogéneamente a PAT	3.073***	Rechazo
AC no causa homogéneamente a HE	5.113***	Rechazo
HE no causa homogéneamente a AC	0.202	Acepta
PIB2 no causa homogéneamente a PIB	9.484	Acepta
PIB no causa homogéneamente a PIB2	6.975	Acepta
ER no causa homogéneamente a PIB	3.411***	Rechazo
PIB no causa homogéneamente a ER	4.644***	Rechazo
PAT no causa homogéneamente a PIB	2.667***	Rechazo
PIB no causa homogéneamente a PAT	4.720***	Rechazo
AC no causa homogéneamente a PIB	3.044***	Rechazo
PIB no causa homogéneamente a AC	-0.014	Acepta
ER no causa homogéneamente a PIB2	6.185***	Rechazo
PIB2 no causa homogéneamente a ER	4.954***	Rechazo
PAT no causa homogéneamente a PIB2	4.440***	Rechazo

PIB2 no causa homogéneamente a PAT	3.682***	Rechazo
AC no causa homogéneamente a PIB2	4.349***	Rechazo
PIB2 no causa homogéneamente a AC	4.954	Acepta
PAT no causa homogéneamente a ER	4.112***	Rechazo
ER no causa homogéneamente a PAT	2.908***	Rechazo
AC no causa homogéneamente a ER	3.544***	Rechazo
ER no causa homogéneamente a AC	1.466	Acepta
AC no causa homogéneamente a PAT	7.601***	Rechazo
PAT no causa homogéneamente a AC	0.071	Acepta

Nota: \*\*\* denota un rechazo de la hipótesis nula al 1%, respectivamente.

Fuente: Elaboración propia, con tratamiento en Eviews 12

Como se puede observar en la tabla 8, existe una relación bidireccional entre las variables PIB y HE, PIB2 y HE, ER y HE, PAT y HE, ER y PIB, PAT y PIB, ER y PIB2, PAT y PIB2 y por último PAT y ER. El que exista esta relación bidireccional señala que el comportamiento entre estas variables es complementario. De igual manera existe una relacional causal unidireccional de AC con HE, AC con PIB, AC con PIB2, AC con ER y AC con PAT. Lo anterior implica que la apertura comercial juegue un papel importante en el desempeño de las variables utilizadas en el presente estudio.

## 5. Conclusiones

En la actualidad el problema de la degradación ambiental y los efectos negativos que consigo lleva se han convertido en un parteaguas para el análisis de la mayoría de las economías a nivel mundial, desde que factores originan el incremento de esta degradación, así como cuales son los métodos más adecuados para poder combatirla. En la búsqueda de una explicación para lo anterior señalado, el presente artículo analiza la hipótesis de la Curva Ambiental de Kuznets para los países pertenecientes del G7, los países pertenecientes a los BRICS y para el caso de México en el periodo de 1990-2022. Para analizar la degradación ambiental que se propone en la CAK, se implementó el indicador de huella ecológica, la cual incluye el uso de diversas categorías de superficies productivas, algo que las emisiones de CO2 no contemplan. Para la validación de la investigación, se aplicó el análisis de panel de datos, mediante pruebas como la dependencia de corte transversal o sección cruzada, pruebas de raíz unitaria de primera y segunda generación, pruebas de cointegración y de causalidad en el largo plazo. Se utilizaron los estimadores de mínimos cuadrados completamente modificados (FMOLS) y el Método de Regresión Cuantil de Momentos con la finalidad de validar y robustecer los resultados de largo plazo. En términos de resultados, se obtiene que todas las variables muestran una dependencia de sección cruzada, que están integradas en primer orden y que existe una relación de equilibrio en el largo plazo de todas las variables. Ambos estimadores son consistentes en los resultados arrojados confirmando la hipótesis de la CAK (Panayotou, 1993; Dinda 2004). De igual manera se confirma que el consumo de energías renovables juega un papel fundamental en la reducción de la degradación ambiental a través de la huella ecológica, siendo consistente con la literatura presentada (Guardado y Cruz, 2024). Para el caso de las patentes, se confirma una relación positiva significativa en el largo plazo con la huella ecológica, esto podría causarse derivado de un mal manejo de políticas que faciliten la absorción tecnológica (Sweet and Eterovic, 2019; Cheng, Ren y

Wang, 2019 y Ben Youssef, 2020). Para el caso de la apertura comercial, esta tuvo de igual manera una relación positiva y significativa con la huella ecológica, que, de acuerdo con la literatura, pudiera ser causado por un aumento en la producción, por un aumento de las actividades del mercado y por una mayor apertura para el acceso a bienes y servicios sin un control riguroso en sus efectos medioambientales (Dinda, 2004 y Gómez y Rodríguez, 2020).

Se puede concluir que es importante que los tomadores de decisiones se centren, por ejemplo, en crear políticas energéticas más eficaces para el fortalecimiento y desarrollo de patentes que tengan un impacto real, así como igualmente se concientice tanto a empresas como a la sociedad en consumir energías renovables. De igual manera, se sugiere que la apertura comercial esté acompañada de políticas sustentables y sostenibles, las cuales permitan generar una dinámica de crecimiento favoreciendo la disminución de la degradación ambiental.

### Agradecimientos

La presente investigación se llevó a cabo en la UNAM-FES Acatlán durante la estancia posdoctoral y contó con recursos a través del Programa de Becas Posdoctorales de la UNAM.

### Referencias bibliográficas

- Acs Z., Anselin L. y Varga A. (2002). Patents and innovation counts as measures of regional production of new knowledge. *Res Policy* 31:1069–1085
- Altıntas, H.; Kassouri, Y. (2020) *Is the environmental Kuznets Curve in Europe related to the per-capita ecological footprint or CO2 emissions?* *Ecol. Indic.* 2020, 113, 106187.
- Álvarez-Herránz, A.; Balsalobre, D.; Cantos, J.M.; Shahbaz, M. (2017). *Energy Innovations-GHG Emissions Nexus: Fresh Empirical Evidence from OECD Countries*. *Energy Policy* 2017, 101, 90–100.
- Baltagi, B.; Pesaran, M. (2007). Heterogeneity and cross section dependence in panel data models: Theory and applications introduction. *J. Appl. Econ.* 22, 229–232
- Banco Mundial (BM). (2022). Renewable energy consumption (% of total final energy consumption) – Mexico. <https://data.worldbank.org/indicator/EG.FEC.RNEW.ZS?locations=MX>
- Beckerman, W. (1992). *Economic growth and the environment: Whose growth? Whose environment?* *World Dev.* 1992, 20, 481–496.
- Bekhet, H.A.; Othman, N.S. (2018). *The role of renewable energy to validate dynamic interaction between CO2 emissions and GDP toward sustainable development in Malaysia*. *Energy Econ.* 2018, 72, 47–61.
- Charfeddine, L.; Mrabet, Z. (2017). *The impact of economic development and social-political factors on ecological footprint: A panel data analysis for 15 MENA countries*. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 76, 138–154.
- Churchill, S.; Inekwe, J.; Ivanovski, K.; Smyth, R. (2018). The Environmental Kuznets Curve in the OECD: 1870–2014. *Energy Econ.* 75, 389–399.
- Dinda, S. (2004). *Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey*. *Ecol. Econ.* 2004, 49, 431–455.
- Dinda, S. (2010). *Environmental Kuznets Curve: An Envelope of Technological Progress*. Chandragupt Institute of Management Patna, India

- Dogan, E.; Ulucak, R.; Koçak, E.; Işık, C. (2020). *The use of ecological footprint in estimating the Environmental Kuznets Curve hypothesis for BRICST by considering cross-section dependence and heterogeneity*. *Sci. Total. Environ.* 2020, 723, 138063.
- Dumitrescu, E. Hurlin, C. (2012). Testing for Granger non-causality in heterogeneous panels. *Econ. Model.* 29, 1450–1460.
- Enrique, G. y Felipe, C. (2024). Consumo de energías renovables y sus principales determinantes en países desarrollados y emergentes, 1996-2020. *FACE: Revista De La Facultad De Ciencias Económicas Y Empresariales*, 24(3), 103-116. <https://doi.org/10.24054/face.v24i3.3324>
- Fallahi, F., (2011). Causal Relationship between Energy Consumption (EC) and GDP: a Markov-Switching (MS) Causality. *Energy* 36, 4165–4170.
- Friedl, B. y Getzner, M. (2003). Determinants of CO2 Emissions in a Small Open Economy. *Ecological Economics* 45, 133-148.
- Gómez, M., & Rodríguez, J. C. (2020). The Ecological Footprint and Kuznets Environmental Curve in the USMCA Countries: A Method of Moments Quantile Regression Analysis. *Energies*, 13(24), 6650. <https://doi.org/10.3390/en13246650>
- International Energy Agency (IEA). (2022). Achieving Net Zero Heavy Industry Sectors in G7 Members. <https://www.iea.org/reports/achieving-net-zero-heavy-industry-sectors-in-g7-members>
- Jie, P. (2010). Environmental Kuznets Curve for CO2 in Canada. *Ecological Economics* 69, 1083 – 1093.
- Levin, A.; Lin, C.-F.; Chu, C.-S.J. (2002). Unit root tests in panel data: Asymptotic and finite-sample properties. *J. Econ.* 108, 1–24.
- Lin, B.; Omoju, O.E.; Nwakeze, N.M.; Okonkwo, J.U.; Megbowon, E.T. (2016). *Is the environmental Kuznets curve hypothesis a sound basis for environmental policy in Africa?* *J. Clean. Prod.* 2016, 133, 712–724.
- Liu, X.; Zhang, S.; Bae, J. The impact of renewable energy and agriculture on carbon dioxide emissions: Investigating the environmental Kuznets curve in four selected ASEAN countries. *J. Clean. Prod.* 2017, 164, 1239–1247.
- Meadows, D.; Meadows, D.; Randers, J. y Behrens, W. (1972). *Los límites del crecimiento: informe al Club de Roma sobre el predicamento de la humanidad*. Fondo de Cultura Económica, México.
- Mesarovic, M. y Pestel, E. (1975). *La humanidad en la encrucijada, segundo informe del Club de Roma*. Fondo de Cultura Económica, México.
- Ortíz-Paniagua, C. y Gómez, M. (2021). Crecimiento económico y calidad ambiental en América Latina, perspectiva desde Kuznets, 1970-2016. *Econ: teor. práct*, 55. <https://doi.org/10.24275/etypuam/ne/552021/ortiz>.
- Panayotou, T. (1993). *Empirical Tests and Policy Analysis of Environmental Degradation at Different Stages of Economic Development*. International Labour Organization: Geneva, Switzerland, 1993; pp. 1–42.
- Popp, D. (2005). Lessons from patents: Using patents to measure technological change in environmental models. *Ecol. Econ.*, 54, 209–226.
- Pedroni, P. (1999). Critical Values for Cointegration Tests in Heterogeneous Panels with Multiple Regressors. *Oxf. Bull. Econ. Stat.* 61, 653–670.
- Pedroni, P. (2004). Fully modified OLS for heterogeneous cointegrated panels. In *Advances in Econometrics*; ElsevierBV: Amsterdam, The Netherlands, pp. 93–130.
- Pesaran, M. (2007). A simple panel unit root test in the presence of cross-section dependence. *J. Appl. Econ.* 22, 265–312.



- Im, K.-S.; Pesaran, M.H.; Shin, Y. (2003). Testing for unit roots in heterogeneous panels. *J. Econ.* 115, 53–74.
- Samour, A., Adebayo, T. S., Agyekum, E. B., Khan, B. y Kamel, S. (2023). Insights from BRICS-T economies on the impact of human capital and renewable electricity consumption on environmental quality. *Scientific Reports*, 13(5245). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32134-1>
- Secretaría de Energía (SENER). (2021). Sistema de Información Energética. <https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=IE0C01>
- Stern, D. (2001). The Rise and Fall of the Environmental Kuznets Curve. *World Development* 32 (8), 1419–1439.
- Westerlund, J. (2007). Testing for Error Correction in Panel Data. *Oxf. Bull. Econ. Stat.* 69, 709–748.
- Yang, H., He J. y Chen S. (2014). The Fragility of the Environmental Kuznets Curve: Revisiting the Hypothesis with Chinese Data via an “Extreme Bound Analysis”. *Ecological Economics* 109, 41-58.
- Youssef, S. (2020). Non-resident and resident patents, renewable and fossil energy, pollution, and economic growth in the USA. *Environ Sci Pollut Res* 27, 40795–40810. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10047-0>
- Zilio, M. (2012). *Curva de Kuznets ambiental: La validez de sus fundamentos en países en desarrollo*. Cuadernos de Economía 2012, 35, 43–54.