

Europa y la curva medioambiental de Kuznets: un avance hacia una economía sostenible*

[Versión en castellano]

Europe and the Kuznets Environmental Curve:
A Move Toward a Sustainable Economy

A Europa e a curva ambiental de Kuznets: um movimento
em direção a uma economia sustentável

Recibido el 15/03/2022. Aceptado el 12/05/2023

› Para citar este artículo:

Gómez, C. F., Cerquera, Ó. H. y
Rojas, L. (2024). Europa y la curva
medioambiental de Kuznets:
un avance hacia una economía
sostenible. *Ánfora*, 31(56), 258-278.
<https://doi.org/10.30854/anfv31.n56.2023.923>
Universidad Autónoma de
Manizales. L-ISSN 0121-6538.
E-ISSN 2248-6941.
CC BY-NC-SA 4.0

Camilo Fabiam Gómez Segura**

<https://orcid.org/0000-0002-0043-105X>

CvLAC https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001507815

Colombia

Óscar Hernán Cerquera Losada***

<https://orcid.org/0000-0002-7945-6670>

CvLAC https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001363511

Colombia

Libardo Rojas Velásquez****

<https://orcid.org/0000-0002-2588-2658>

CvLAC https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000152235

Colombia

* Esta investigación fue avalada por la Universidad Surcolombiana – grupo de investigación IGUAQUE y fue finalizada en diciembre de 2021. Financiación: esta investigación es el trabajo realizado en equipo por los autores, con sus propios recursos. Declaración de intereses: los autores declaran que no se presenta conflicto de intereses. Disponibilidad de datos: todos los datos relevantes se encuentran en el artículo.

** Magister en Economía, Universidad Nacional de La Plata. Docente de tiempo completo, Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia. Correo electrónico: camilo.gomez@usco.edu.co

*** Magister en Economía, Universidad de Buenos Aires. Docente de tiempo completo, Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia. Correo electrónico: oscar.cerquera@usco.edu.co

**** Candidato a Doctor en Ciencias Económicas y Administrativas, Universidad ICESI, Cali, Colombia. Asistente de Investigación, Cali, Colombia. Correo electrónico: lrojas@icesi.edu.co

Resumen

Objetivo: comprobar la hipótesis de la Curva Medioambiental de Kuznets (CMK) en las emisiones de Dióxido de Carbono (CO₂) y gas invernadero para los países que pertenecen a la Unión Europea (UE) periodo 1990-2012. **Metodología:** se tomó como insumo la base de datos de Banco Mundial, la cual contiene 21 indicadores: agricultura y desarrollo rural, eficiencia, crecimiento económico, educación, energía y minería, medio ambiente, sector financiero, salud, infraestructura, trabajo y protección social, pobreza, sector privado, sector público, ciencia y tecnología, desarrollo social, desarrollo urbano, género, objetivos de desarrollo sostenible, cambio climático, deuda externa y comercio. Con base en ello, se estimó un modelo de datos panel bajo tres métodos: efectos aleatorios, efectos fijos y primeras diferencias. **Resultados:** se encuentra que existe una relación en forma de U invertida entre el nivel de ingreso (PIB per cápita) y los indicadores de contaminación; sin embargo, presenta niveles elevados de contaminación cuando se tiene un nivel de ingreso de un país como Luxemburgo, lo cual puede deberse a un bajo rendimiento decreciente en el PIB per cápita respecto a los niveles de contaminación. Así mismo, se encuentra que el uso de energía, la población y el sector industrial contribuyen a incrementar los niveles de deterioro ambiental. **Conclusiones:** la relación entre el crecimiento económico y el deterioro ambiental no solo debe enfocarse en su estructura; también es necesario que este tipo de problemática realmente sea parte de la política económica de los países de la UE y su aplicación en los objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

Palabras clave: curva medioambiental de Kuznets; Dióxido de Carbono; gas invernadero; crecimiento económico.

Abstract

Objective: To test the hypothesis of the Environmental Kuznets Curve (EKC) on Carbon Dioxide (CO₂) and greenhouse gas emissions for European Union (EU) countries during the period 1990-2012. **Methodology:** Input was taken from the World Bank database, which contains 21 indicators: agriculture and rural development, efficiency, economic growth, education, energy and mining, environment, the financial sector, health, infrastructure, labor and social protection, poverty, the private sector, the public sector, science and technology, social development, urban development, gender, sustainable development objectives, climate change, external debt, and trade. Based on this, a panel data model was estimated using three methods: random effects, fixed effects, and first differences. **Results:** It is found that there is an inverted U-shaped relationship between income level (GDP per capita) and pollution indicators. However,

high levels of pollution are present with an income level of a country like Luxembourg, which may be due to a decreasing underperformance in GDP per capita with respect to pollution levels. Likewise, it is found that energy use, population, and the industrial sector contribute to increasing levels of environmental deterioration. **Conclusions:** The relationship between economic growth and environmental degradation should not only focus on the economic structure. Solutions to this type of problem must be a part of the economic policy of the EU countries and the policy's implementation in the Sustainable Development Goals (SDGs).

Keywords: Kuznets environmental curve; Carbon dioxide; greenhouse gas; economic growth.

Resumo

Objetivo: testar a hipótese da Curva de Kuznets Ambiental (ECK) sobre o dióxido de carbono (CO₂) e as emissões de gases de efeito estufa para os países pertencentes à União Europeia (UE) no período de 1990 a 2012. **Metodologia:** os dados foram extraídos do banco de dados do Banco Mundial, que contém 21 indicadores: agricultura e desenvolvimento rural, eficiência, crescimento econômico, educação, energia e mineração, meio ambiente, setor financeiro, saúde, infraestrutura, trabalho e proteção social, pobreza, setor privado, setor público, ciência e tecnologia, desenvolvimento social, desenvolvimento urbano, gênero, metas de desenvolvimento sustentável, mudança climática, dívida externa e comércio. Com base nisso, foi estimado um modelo de dados em painel com três métodos: efeitos aleatórios, efeitos fixos e primeiras diferenças. **Resultados:** constatou-se que há uma relação em forma de U invertido entre o nível de renda (PIB per capita) e os indicadores de poluição; no entanto, há altos níveis de poluição quando o nível de renda é o de um país como Luxemburgo, o que pode ser devido a um baixo retorno decrescente do PIB per capita em relação aos níveis de poluição. O uso de energia, a população e o setor industrial também contribuem para o aumento dos níveis de degradação ambiental. **Conclusões:** a relação entre crescimento econômico e degradação ambiental não deve se concentrar apenas em sua estrutura; também é necessário que esse tipo de questão realmente faça parte da política econômica dos países da UE e de sua implementação nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Palavras chave: curva de Kuznets ambiental; dióxido de carbono; gás de efeito estufa; crescimento econômico.

Introducción

En las últimas décadas se ha experimentado un continuo desarrollo productivo que tiene como fundamento el uso de factores productivos, siendo uno de ellos los recursos naturales. En este sentido, cabe preguntarse: *¿el continuo desarrollo económico trae consigo un deterioro en el medio ambiente?* Para poder responder a esta pregunta es importante analizar que la estructura económica en los últimos años ha tenido una transformación, debido a la innovación tecnológica que ha llevado a mejorar los procesos productivos en pro del uso eficiente de los recursos naturales (tecnologías limpias). Además, si a esto le agregamos una legislación en contra del deterioro del medio ambiente, es posible subsanar los efectos de la actividad productiva en el medio ambiente.

Es por ello que establecer las causas y consecuencias de la actividad económica en el medio ambiente es un tema crucial en la agenda política y económica mundial (y, por ende, europea). Ejemplo de esto es la posición de la Unión Europea (UE) en materia del desarrollo sostenible a través de la aplicación en el marco político europeo de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, que tiene como objetivo establecer y asegurar el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en los cuales se incluye proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los recursos naturales. En este sentido, la política internacional ha tomado conciencia de la necesidad de un crecimiento económico sostenible; en otras palabras, un cambio en su estructura productiva que permita transformar los procesos de producción en conjunto con un desarrollo tecnológico en función de preservar el medio ambiente.

Ahora bien, un método que permite estimar o aproximar los efectos de la actividad productiva en el medio ambiente es la conocida curva medioambiental de Kuznets (CMK), la cual consiste en establecer una relación empírica en forma de U invertida entre el crecimiento económico y el detrimento ambiental. Países con elevados indicadores de deterioro ambiental están correlacionados con una disminución en sus niveles de ingreso, y a medida que se incrementa el ingreso per cápita los países tienden a tener bajos niveles de contaminación (Grossman y Krueger, 1995).

El trabajo titulado *Economic Growth and Income Inequality*, desarrollado por Simon Kuznets (195) se convierte en la base de lo que se conoce como la CMK. La idea consiste en que hay una relación en forma de U invertida entre el crecimiento económico y la distribución del ingreso en el largo plazo, matemáticamente se conoce como la relación entre variables, siendo estrictamente cóncava. En otras palabras, para países con ingresos bajos, tienen una menor concentración del ingreso. A medida que se incrementa el ingreso, tiende a aumentar su

concentración, llegando a un punto máximo (inflexión); lo que conlleva después a una disminución en la concentración para países con elevados niveles de ingreso. Debido a la falta de un modelo formal que permite establecer esta relación, Kuznets se apoya en la evidencia empírica para establecer que los cambios en la distribución del ingreso tienen una relación con el crecimiento económico de los países. Para llegar a establecer esta relación se basa en tres componentes. El primero es la estructura poblacional, la cual establece que la población tiende a concentrarse en la zona urbana, donde puede emplearse en actividades con mayores salarios —y, por ende, crecimiento económico— y así generar un cambio en la distribución del ingreso debido al incremento en la participación del ingreso de familias con bajos salarios. El segundo lo constituyen los cambios en la actividad económica a favor de la industria, los cuales generan un aumento en el ingreso per cápita; principalmente, a los deciles más bajos de la distribución del ingreso. Y, por último, la concentración del ahorro, que permite generar inversión, lo que se traduce en acumulación de factores productivos, mayor productividad y crecimiento económico.

Grossman y Krueger (1991) realizan el primer trabajo que estudia la relación empírica entre el crecimiento económico y los indicadores de contaminación ambiental. Tienen como objetivo establecer los efectos que tiene el comercio en el medio ambiente para los años 1977, 1982 y 1988. Los autores, con ayuda de un modelo de datos panel, encuentran que países con bajo niveles de PIB per cápita tienen mayores indicadores de deterioro ambiental; no obstante, a medida que se aumenta el nivel de ingreso (PIB per cápita) se reducen los indicadores de contaminación. Concluyen que países con altos ingresos presentaron cambios en su estructura productiva a través del desarrollo tecnológico y que, junto a una estricta regulación ambiental, han generado mejores indicadores de calidad ambiental.

Por su parte, Shafik y Bandyopadhyaya (1992) estudian la correlación entre el deterioro ambiental y el crecimiento económico (PIB per cápita) para 149 países durante el periodo 1960-1990. Establecen que existe una relación en forma de U invertida entre el crecimiento económico y los indicadores de deterioro ambiental, como es el caso de las partículas suspendidas en el aire y la deforestación. No obstante, los indicadores de contaminación del agua (agua limpia y disolución de Oxígeno en el agua) tienen un efecto negativo en relación con los niveles de ingreso. Según los autores, los elevados costos de tratamiento pueden reducir indirectamente los niveles de ingresos.

El primer trabajo estructural que consiste en estudiar la relación empírica entre crecimiento económico y el deterioro ambiental fue desarrollado por Grossman y Krueger (1995). Para esto emplean el PIB per cápita como variable que mide el nivel de ingreso y cuatro grupos de indicadores ambientales. A partir

de un modelo de datos panel, los autores encuentran que existe una relación en forma de U invertida entre el crecimiento económico y los indicadores de deterioro ambiental. Así mismo, estiman que países con un PIB per cápita entre \$8.000 y \$10.000 dólares tienen bajos índices de contaminación con relación a países de menores ingresos.

No obstante, establecen que es importante aclarar que esta relación no es determinista; es decir, la información pasada (el seguimiento del ingreso de los países) no permite determinar de manera precisa el nivel de contaminación (resultado) de los mismos. Sin embargo, desde el punto de vista empírico, existe. Ellos plantean que una estricta regulación ambiental (política pública), el cambio de las preferencias de los agentes por bienes menos intensivos en contaminación y una gran inversión en tecnologías limpias generan que los países con mayor desarrollo tiendan a un crecimiento sostenible.

En este mismo sentido, Bruyn *et al.* (1998) investigan la existencia de la CMK en tres países europeos (Alemania, Países Bajos y Reino Unido) y Estados Unidos durante el periodo 1960-1993. Plantean un modelo a través de la intensidad en la emisión de contaminantes (Dióxido de Carbono (CO_2), Óxido de Nitrógeno (NO_x) y Dióxido de Sulfuro (SO_2)) que establece de una mejor manera los cambios en la estructura productiva, tecnología y regulación ambiental. Las estimaciones reflejan que existe una relación positiva entre el crecimiento económico y la intensidad en las emisiones de contaminación, debido a un efecto compensador gracias a los cambios en los procesos productivos y la regulación ambiental.

Así mismo, Stern y Common (2001) buscan establecer la hipótesis de la CMK para 73 países durante el periodo 1960-1990. Los autores proponen corregir la especificación del modelo estructural que se ha venido planteando a través del Azufre (S) como variable dependiente. Según los autores, no existe una variable que determine el comportamiento de la contaminación; es decir, puede existir sesgo por variables omitidas o simultaneidad; por ello, el Azufre surge como indicador, ya que tiene tecnología que permite controlar su emisión. Los resultados obtenidos muestran que existe la CMK para países desarrollados y no desarrollados, con un punto de inflexión (máximo) en los niveles de contaminación mucho menor para los países en desarrollo. Lo anterior, dado que algunos indicadores, como las emisiones creadas por la producción de carbón, no pueden ser tratados por los países en desarrollo, debido al elevado costo de su tratamiento.

En esta misma línea se encuentra el estudio de Ahmed *et al.* (2016), quienes estudian la relación causal entre crecimiento económico y las emisiones de Dióxido de Carbono (CO_2) en 24 países europeos durante el periodo 1980-2010. Los autores a través de un panel dinámico comprueban que existe la CMK en el largo plazo entre el crecimiento económico y las emisiones de CO_2 . Así mismo, encuentran que la bioenergía (se entiende por 'bioenergía' a la energía procedente

de la biomasa, la cual es el material de origen biológico) no tiene una relación significativa. Por su parte, el desarrollo tecnológico tiene una relación negativa y significativa con respecto a la contaminación ambiental. Concluyen que es posible generar un crecimiento económico sostenible a través de políticas públicas que incentiven el uso de energías renovables.

Otro estudio es el de Pablo-Romero y Sánchez-Braza (2017), en el que se relaciona el consumo de energía y el ingreso para 28 países de la Unión Europea para el periodo 1990-2013. Allí se estima un modelo de panel de datos y un modelo de efectos mixtos multinivel, con lo que se confirma la hipótesis de la curva medioambiental de Kuznets para el sector residencial en los 28 países europeos. Además, se concluye que Dinamarca, Luxemburgo, Finlandia, Países Bajos y Suecia fueron los únicos países que alcanzaron el punto más alto de la CMK.

Para los países de G7, Raza y Shah (2018) examinaron el impacto del comercio, crecimiento económico y las energías renovables para los periodos de 1991-2016. Los autores emplearon modelos de panel de datos con efectos fijos y estiman con totalmente modificados mínimos cuadrados ordinarios y mínimos cuadrados ordinarios dinámicos para analizar el efecto a largo plazo. La investigación muestra que el crecimiento económico (y lo relacionado a importaciones y exportaciones) y el comercio aumenta las emisiones de CO₂ en el largo plazo, mientras que el consumo de energías renovables los reduce en el largo plazo. Los autores concluyen que estos resultados soportan la hipótesis de CMK en los países de G7 y que las energías renovables tienen una relación causal bidireccional con la emisión de CO₂ para dichos países.

Además de esto, Altintas y Kassouri (2020) estudiaron el nexo ambiente-desarrollo económico en el largo plazo. Para ello desagregaron el componente ambiental en emisión de CO₂ y la huella ecológica (Cantidad de tierra biológica necesaria para que un ser humano pueda absorber las emisiones de Dióxido de Carbono) como variable dependiente. Para la investigación se estimaron cuatro modelos de panel de datos estimado por enfoque de pruebas de dependencia transversal y heterogeneidad para los 14 países europeos que conforma el EU-14 (países que ratificaron sus objetivos de aumentar la participación de energías renovables) entre los periodos de 1990-2014. Los autores concluyen que la hipótesis de CMK es muy sensible en lo relacionado con la variable desagregada en el componente ambiental.

Así mismo, Pontarollo y Serpieri (2020) para demostrar la existencia de la hipótesis de la curva medioambiental de Kuznets utilizan un método de econometría espacial con datos panel para unos condados de Rumania entre los años 2000-2014. Concluyen que se presenta una U invertida, lo que indica niveles más altos de área urbanizada para los niveles más altos de riqueza.

De igual forma, Boubellouta y Brandt (2020) buscan comprobar la hipótesis de la CMK utilizando como indicador ambiental los desechos electrónicos en 30 países europeos (Incluye los países que hacen parte de la Unión Europea agregando a Noruega, Reino Unido y Suiza). durante el periodo 2000-2016. Los autores emplean el método de los momentos generalizados (GMM) y mínimos cuadrados en dos etapas (MC2E) para generar estimadores robustos. Los resultados obtenidos muestran que existe una relación en forma de U invertida entre el crecimiento económico y la generación de desechos electrónicos; no obstante, aunque un crecimiento económico sostenido pueda inferir menores niveles de desechos electrónicos, los niveles de ingreso (PIB per cápita) deben ser muy elevados. Es por ello que plantean que debe existir un trabajo coordinado entre cada uno de los agentes (Gobierno, empresa y familias) que permita generar un esquema de recolección efectiva y eficiente para los desechos electrónicos.

Para los países de la Unión Europea y los Balcanes occidentales, Pejovic *et al.* (2021) analizaron la relación entre crecimiento económico (con el PIB per cápita), consumo de energía y emisiones de CO₂ Para el periodo 2008-2018. Ellos desarrollaron un modelo de panel de datos con enfoque de vector autorregresivo (VAR) y evaluaron los estimadores con métodos generalizados de los momentos. Con lo anterior, los autores concluyeron que la CMK existe dependiendo el nivel de ingreso del país.

De igual manera, Filippidis *et al.* (2021) relacionaron variables como el crecimiento económico y el consumo de energía, el consumo de energía y la inequidad de ingresos y el crecimiento económico y la producción de energía para alrededor de 200 países en el periodo 2000-2019. Para ello emplearon una regresión de panel de datos no lineales. Los autores concluyen que en la relación crecimiento económico y energía renovable se presenta una curva con forma de U, mientras que en la relación de crecimiento económico y el consumo de energía fósiles sí se presenta una forma de U invertida, demostrando la hipótesis de CMK.

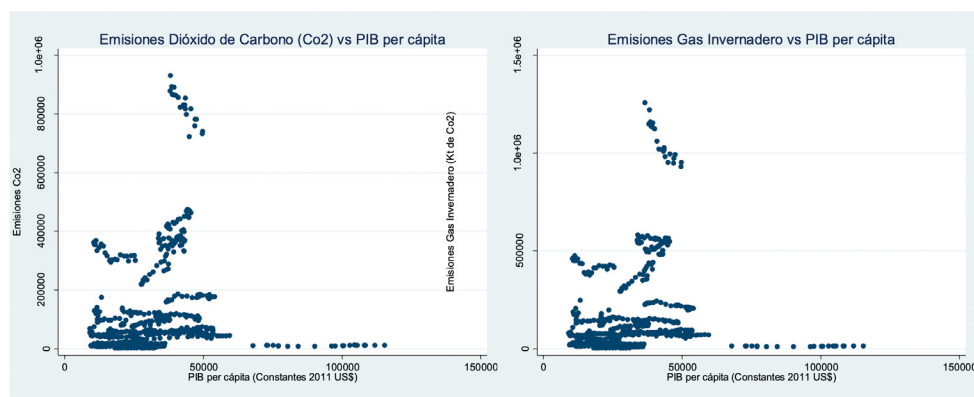
En Francia y Alemania, Ma *et al.* (2021) cuantifican la relación entre PIB real, la emisión de CO₂ y el consumo de energías renovables y no renovables para los datos disponibles de 1995-2015. Se desarrolla un modelo de panel de datos y se les aplica la prueba de dependencia Cross-Sectional, la prueba de raíz unitaria en datos panel y la prueba de cointegración. El estudio revela evidencia de una relación de la forma U invertida en las variables de emisiones de CO₂ y el PIB real para el largo plazo en los dos países europeos, demostrando la teoría de CMK.

A su vez, Sharman *et al.* (2021) desarrollaron un estudio de panel de datos en el que emplearon estimaciones dinámicas de Arellano-Bond y estimaciones de sistemas dinámicos para 27 países de la Unión Europea. Analizaron la relación del consumo de las energías renovables y no renovables con el desarrollo económico en

el corto y largo plazo. Los autores evidenciaron que en el corto plazo no se cumple la hipótesis CMK, pero que a largo plazo la relación describe una U invertida.

Para iniciar con el análisis de esta problemática en la Unión Europea, en la figura 1 se muestran las emisiones de Dióxido de Carbono (CO_2) y gas invernadero (gases que absorben la radiación infrarroja del sol y aumentan la temperatura de la atmósfera) en función del Producto Interno Bruto (PIB) per cápita para los países que hacen parte de la UE durante el periodo 1990-2012. Como se puede observar, existe una especie de correlación cóncava entre el PIB per cápita y ambos indicadores. Países con bajos ingresos tienen una correlación positiva con los indicadores de deterioro ambiental; sin embargo, parece que a medida que los países tienen un mayor nivel de ingreso, las emisiones de Dióxido de Carbono (CO_2) y gas invernadero aumentan, llegando a un nivel máximo, para luego tender a decrecer. No obstante, este tipo de análisis es insuficiente para afirmar que existe una relación en forma de U invertida.

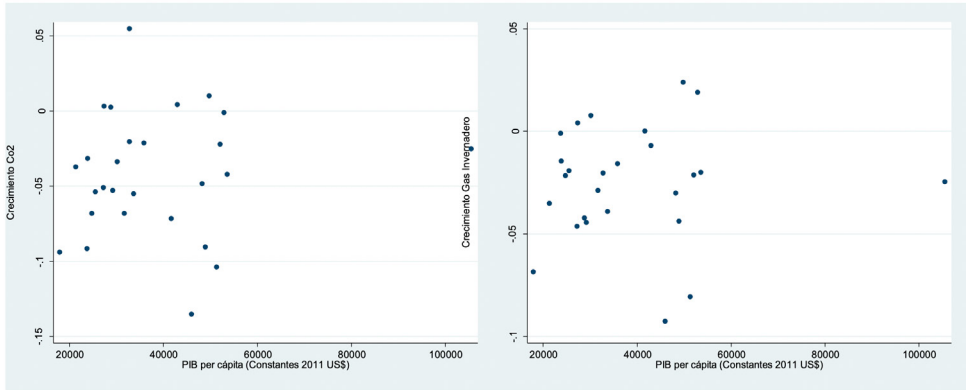
Figura 1. Emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y gas invernadero vs PIB per cápita para los países de la Unión Europea durante el periodo 1990-2012.



Fuente: elaboración propia, con base en los datos del Banco Mundial.

Igualmente, en la figura 2 se presenta la dispersión entre el crecimiento de las emisiones de Dióxido de Carbono (CO_2) y gas invernadero respecto al PIB per cápita para los países de la UE durante el periodo 1990-2012. Los datos muestran que existe una posible convergencia negativa entre la tasa de crecimiento de los indicadores de contaminación ambiental (CO_2 y gas invernadero) y el nivel de ingreso (PIB per cápita). En otras palabras, a medida que pasamos a países con mayores niveles de ingreso, estos tienden a tener menores tasas de crecimiento de Dióxido de Carbono (CO_2) y gas efecto invernadero.

Figura 2. Crecimiento de dióxido de carbono (CO₂) y gas invernadero vs PIB per cápita para los países de la Unión Europea durante el periodo 1990 - 2012.



Fuente: elaboración propia, con base en los datos del Banco Mundial.

No obstante, afirmar que existe una cierta correlación entre las emisiones de CO₂ y gas invernadero en relación con el nivel de ingreso (PIB per cápita) en los países de la UE a través de figuras no es suficiente. La curva medioambiental de Kuznets surge como método empírico que permite comprobar si existe relación entre el crecimiento económico y el deterioro ambiental. Así mismo, también ayuda a contribuir a la generación de políticas públicas que permitan generar un crecimiento económico sostenible con el medio ambiente. Esto, debido a que se pueden establecer los efectos de la producción en los recursos naturales, no solo a través de su uso, sino también a través de las externalidades en materia de contaminación que puede generar. Por ello, el objetivo de esta investigación es comprobar si existe empíricamente la curva medioambiental de Kuznets en las emisiones de Dióxido de Carbono (CO₂) y gas efecto invernadero para los países de la UE durante el periodo 1990-2012.

Metodología

Para desarrollar esta investigación se utiliza la base de datos del Banco Mundial (The World Bank, 2020), la cual tiene información de siete regiones, 264 países y 21 indicadores (género, salud, educación, agricultura y desarrollo rural, cambio climático, ciencia y tecnología, desarrollo social, desarrollo urbano, eficacia de la ayuda, energía y minería, infraestructura, medio ambiente, pobreza y política económica y deuda). Este trabajo contiene información de los países miembros de la Unión Europea, siendo una investigación de nivel explicativo, ya que busca

comprobar empíricamente la existencia de la CMK. Siguiendo a Grossman y Krueger (1995), la siguiente ecuación presenta a través de un modelo de panel de datos la relación cuadrática de la CMK:

$$y_{it} = \alpha_i + \varphi_t + \beta_1 PIB_{it} + \beta_2 PIB_{it}^2 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_{j,it} + v_{it}$$

Donde y_{it} indica las variables de contaminación ambiental (CO_2 y gas efecto invernadero), PIB es el Producto Interno Bruto per cápita, $X_{j,it}$ es la matriz de variables que pueden estar correlacionadas con el deterioro ambiental (uso de energía, emisiones de metano, valor agregado del sector servicios, valor agregado de la industria, valor agregado de la manufactura, desgaste de los recursos naturales, educación y población), α_i es la heterogeneidad no observable transversal (según los países) y φ_t incluye la heterogeneidad no observable en el tiempo. De igual manera, β es el vector de estimadores y los subíndices i, t indican observaciones para distintos individuos (países) y periodos de tiempo.

Existen tres métodos para estimar la ecuación. Con el primero, conocido como *efecto fijo*, se explica que la heterogeneidad no observada transversal (α_i) está correlacionada con las variables independientes. En otras palabras, el estimador no toma en cuenta los cambios de las variables en el tiempo. El segundo método es todo lo contrario, ya que se plantea que la heterogeneidad no observada entre los individuos (países) no está correlacionada con las variables independientes; es decir, tanto α_i y φ_t son componentes del error (v_{it}). Este método se conoce como *efecto aleatorio*.

Por último, en el tercer método, llamado *primeras diferencias*, se tiene como objetivo eliminar la heterogeneidad cruzada no observable al utilizar como variables la diferencia entre ellas para cada periodo; no obstante, esté método genera una pérdida de información (observaciones), lo cual puede cambiar el análisis de los resultados y su robustez. Para definir desde el punto de vista estadístico, si la heterogeneidad no observable de los individuos (países) está o no correlacionada con las variables independientes, generando estimadores eficientes, aplicamos el test de Hausman, esta prueba realiza la comparación entre los dos tipos de heterogeneidades (α_i y φ_t). Si existen diferencias entre ellas, se establece que la heterogeneidad no observable cruzada (α_i) está correlacionada con las variables independientes, lo que conlleva a utilizar efectos fijos.

Sin embargo, como lo establece Lieb (2003) este tipo de método presenta problemas principalmente de heterocedasticidad y autocorrelación. Para contrarrestar los dos primeros, se emplean las pruebas de *Wald* y *Wooldridge* con el propósito de identificarlos. Una vez hecho esto, se utiliza el método de errores

robustos como alternativa de estimación para modelos que presentan este tipo de problemas.

Resultados

En la tabla 1 se muestra por orden de ingreso (PIB per cápita) las emisiones de Dióxido de Carbono (CO₂) y gas invernadero para los países que hacen parte de la UE durante el año 2012. Como se puede observar, no existe correlación entre el nivel de ingreso y el deterioro ambiental, dado que países como Alemania —que ocupa la sexta posición de la UE en materia de ingresos (\$49,769 dólares)— tienen una elevada concentración de Dióxido de Carbono (170,310 kilotoneladas) y gas invernadero (951,717 kilotoneladas). Todo lo contrario, sucede en países como Letonia, el cual cuenta con un bajo PIB per cápita (\$23,912 dólares), a su vez posee bajos niveles de contaminación (7,063 kilotoneladas de CO₂ y 13,944 kilotoneladas de gas invernadero).

Tabla 1. PIB per cápita, Dióxido de Carbono (CO₂) y gas invernadero en los países de la Unión Europea para el año 2012.

País	PIB per cápita	Dióxido de Carbono	Gas invernadero
Luxemburgo	105,557	10,664	12,611
Austria	53,591	62,273	90,460
Irlanda	52,887	35,592	62,433
Países Bajos	52,104	170,310	195,874
Dinamarca	51,339	36,428	53,703
Alemania	49,796	739,861	951,717
Suecia	48,942	47,048	65,768
Bélgica	48,249	95,107	133,374
Finlandia	45,993	49,134	69,073
Francia	42,968	333,228	499,147
Italia	41,691	369,469	482,634
España	35,840	264,779	348,257
República Checa	33,711	101,030	138,957
Malta	32,758	2,681	-
Eslovenia	32,758	14,782	21,075
Chipre	31,679	6,920	7,431
Portugal	30,194	46,014	72,524
Estonia	29,198	17,624	23,293
Grecia	28,808	80,043	100,571
Lituania	27,381	13,832	29,442

País	PIB per cápita	Dióxido de Carbono	Gas invernadero
Eslovaquia	27,245	32,765	46,301
Polonia	25,562	299,931	414,607
Hungría	24,769	44,583	62,988
Letonia	23,912	7,063	13,944
Croacia	23,757	17,994	30,421
Rumania	21,358	81,723	121,762
Bulgaria	17,955	44,708	67,943

Fuente: elaboración propia, con base en los datos del Banco Mundial.

Debido a la dificultad de establecer una correlación entre los niveles de ingreso y contaminación a través de un simple análisis descriptivo, la siguiente tabla presenta los resultados del modelo planteado anteriormente para las emisiones de Dióxido de Carbono CO_2 . Las estimaciones muestran que existe una relación de U invertida entre el ingreso (PIB per cápita) y las emisiones de Dióxido de Carbono para los países de la UE al utilizar los tres métodos de estimación. Sin embargo, solamente para efectos aleatorios ($\beta_1=1.5131$; $\beta_2=-0.0000074$) y efectos fijos ($\beta_1=3.3755$; $\beta_2=-0.1305$) son significativos estadísticamente. Respecto a las otras variables, en materia de producción de energía, un aumento en el uso de energía (kg equivalente de petróleo) incrementa las emisiones de CO_2 en 313.17 y 324.82 kilotoneladas para efectos aleatorios y fijos respectivamente.

En cuanto a la actividad económica, las estimaciones muestran que solamente el sector de la industria tiene un efecto positivo en las emisiones de Dióxido de Carbono, lo cual se debe principalmente a que este sector tiene procesos productivos que se enfocan en la transformación de materias primas y, por ende, genera contaminación ambiental. Por último, como se esperaba, un incremento en los gastos de educación y la población reducen e incrementan los niveles de Dióxido de Carbono respectivamente. Al aplicar el test de Hausman se comprueba que la heterogeneidad no observada en el tiempo está correlacionada con las variables independientes, lo cual establece que se debe utilizar las estimaciones de efectos aleatorios.

Tabla 2. Resultados de estimación para las emisiones de Dióxido de Carbono (CO_2).

Dióxido de Carbono	Primeras diferencias	Efectos aleatorios	Efectos fijos
PIB	1.0435*** (0.2896)	1.5131*** (0.3219)	1.6075*** (0.3257)
PIB cuadrado	-0.0000053 (0.0000069)	-0.0000074*** (0.0000022)	-0.0000077*** (0.0000022)

Dióxido de Carbono	Primeras diferencias	Efectos aleatorios	Efectos fijos
Emisión Metano	1314.1*** (285.16)	593.70*** (182.96)	705.54*** (193.23)
Uso de energía	455.17*** (55.901)	313.17*** (37.567)	324.82*** (38.632)
PIB Servicios	-0.00000085** (0.00000003)	-0.00000015*** (0.000000012)	-0.00000011*** (0.000000018)
PIB Industria	0.00000048*** (0.00000001)	0.000001*** (0.000000073)	0.000001*** (0.000000074)
PIB Manufacturera	-0.00000013 (0.00000011)	-0.0000007*** (0.000000083)	-0.00000082*** (0.000000088)
Educación	-355.09 (847.29)	-1462.9* (821.19)	-1544.03* (802.62)
Población	0.0055 (0.0023)	0.0057*** (0.0004)	0.0042*** (0.0011)
Desgaste natural	1343.98 (2176.57)	675.96 (25.058)	655.96 (2467.7)
N observaciones	478	504	504
R	0.374	-	-
R within	-	0.654	0.659
R between	-	0.959	0.951
R overall	-	0.957	0.949
Test Hausman	-	4.24	-
Prob (Chi2)	-	(0.3748)	-

Nota: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01.

Fuente: elaboración propia, con base en los datos del Banco Mundial.

Igualmente, en la tabla 3 se presentan las estimaciones para el gas invernadero. Se puede observar que también tiene una relación de relación de U invertida entre las emisiones de gas invernadero y el PIB per cápita para efectos aleatorios ($\beta_1=1.4304$; $\beta_2=-0.000008$) y efectos fijos ($\beta_1=1.5914$; $\beta_2=-0.0000085$), los cuales son significativos estadísticamente. No obstante, según el test de Hausman, se utilizan las estimaciones de efectos fijos, debido a que existe correlación entre las variables independientes y la heterogeneidad no observada entre países. En relación con el uso de energía, un aumento en de un kg de petróleo incrementa la emisión de gas invernadero en 285.19 kilotoneladas. Los resultados para los sectores económicos muestran que solamente la actividad industrial genera un efecto positivo en la emisión de gas invernadero, similar a las estimaciones obtenidas para el Dióxido

de Carbono. Finalmente, un incremento de la población aumenta las emisiones de gas invernadero.

Tabla 3. Resultados de estimación para las emisiones de gas invernadero.

Gas invernadero	Primeras diferencias	Efectos aleatorios	Efectos fijos
PIB	0.8728** (0.3324)	1.4304*** (0.1773)	1.5914*** (0.3779)
PIB cuadrado	-0.000066 (0.000078)	-0.000008*** (0.0000026)	-0.0000085*** (0.0000025)
Emisión Metano	3084.25*** (325.51)	1694.5*** (213.56)	1905.7*** (223.09)
Uso de energía	403.56*** (63.816)	285.19*** (44.111)	309.92*** (44.665)
PIB Servicios	-0.00000006* (0.00000003)	-0.0000002*** (0.000000014)	-0.0000013*** (0.000000021)
PIB Industria	0.00000047*** (0.00000012)	0.0000012*** (0.000000086)	0.0000011*** (0.000000086)
PIB Manufacturera	-0.00000025** (0.00000012)	-0.00000074*** (0.000000097)	0.00000096*** (0.0000001)
Educación	-494.08 (968.66)	-560.82 (980.44)	-742.01 (936.34)
Población	0.0014 (0.0026)	0.0070*** (0.0005)	0.0024* (0.0013)
Desgaste natural	4261.8* (315.73)	1782.9 (2955.06)	2341.9 (2849.6)
N observaciones	475	502	502
R	0.332	-	-
R within	-	0.730	0.741
R between	-	0.969	0.957
R overall	-	0.968	0.953
Test Hausman	-	2.98	-
Prob (Chi2)	-	(0.5619)	-

Nota: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01.

Fuente: elaboración propia, con base en los datos del Banco Mundial.

Como se mencionó anteriormente, en la tabla 4 se muestran las pruebas de Wald y Wooldridge. Las estimaciones confirman que el modelo presenta problemas de heterocedasticidad y autocorrelación serial. Una alternativa para

controlar este tipo de inconvenientes es utilizar el método de errores robustos, debido a que este tipo de modelos son insensibles ante datos atípicos.

Tabla 4. Pruebas de Wald y Wooldridge.

Pruebas	Wald		Wooldridge	
	Chi2	Prob>Chi ²	F	Prob>F
Dióxido de Carbono	270000	0.000	10.43	0.003
Gas invernadero	64205.1	0.000	128.6	0.000

Fuente: elaboración propia, con base en los datos del Banco Mundial.

Adicionalmente, en tabla 5 presenta las estimaciones con efectos fijos robustos para los indicadores de contaminación ambiental utilizados. Como se puede observar, las estimaciones muestran un resultado similar al obtenido sin controlar por heterocedasticidad y autocorrelación serial. Es decir, se puede llegar a inferir empíricamente la existencia de CMK en los países de la Unión Europea. No obstante, cabe aclarar que variables como la población y educación bajo errores robustos no son significativas estadísticamente.

Tabla 5. Resultados de estimación con efectos fijos robustos.

Variables	Dióxido de Carbono	Gas invernadero
PIB	1.6075** (0.7041)	1.5914** (0.7090)
PIB cuadrado	-0.0000077* (0.0000038)	-0.0000085** (0.0000043)
Emisión Metano	705.54** (327.78)	1905.7*** (349)
Uso de energía	324.82** (125.78)	309.92** (125.01)
PIB Servicios	-0.00000011 (0.000000078)	-0.0000013 (0.000000093)
PIB Industria	0.000001*** (0.00000036)	0.0000011*** (0.00000031)
PIB Manufacturera	-0.00000082* (0.00000041)	0.00000096** (0.0000004)
Educación	-1544.03 (1280.4)	-742.01 (1103.8)
Población	0.0042 (0.006)	0.0024 (0.0056)

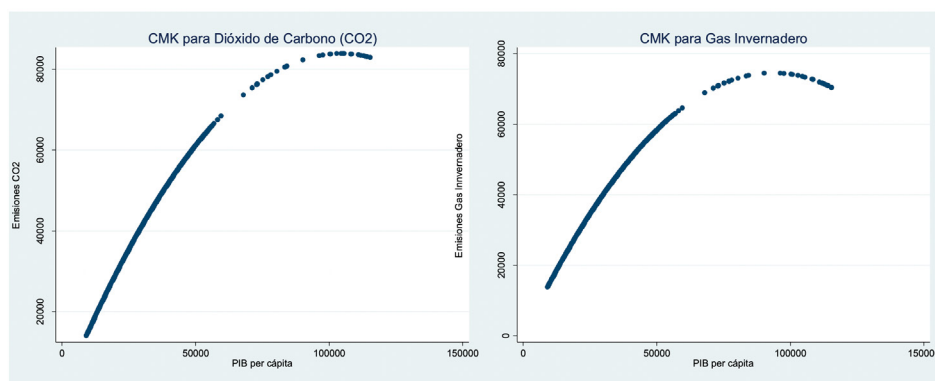
Variables	Dióxido de Carbono	Gas invernadero
Desgaste natural	655.96 (5045.09)	2341.9 (655.07)
N observaciones	504	504
R	-	-
R within	0.659	0.741
R between	0.951	0.957
R overall	0.949	0.953

Nota: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01.

Fuente: elaboración propia, con base en los datos del Banco Mundial.

Para comprobar la existencia de la CMK en los países de la UE se utilizan los parámetros obtenidos anteriormente (β_1 y β_2), como se describe en la figura 3. Según las estimaciones, los países de la Unión Europea alcanzan las máximas emisiones de Dióxido de Carbono y gas invernadero cuando obtienen un PIB per cápita de \$102,236 y \$89,400 dólares respectivamente; es decir, un nivel de ingreso acorde a Luxemburgo (para el caso de los indicadores de contaminación). No obstante, a pesar de tener puntos de inflexión (máximo) implícitos elevados, los resultados no contradicen la hipótesis planteada, lo cual ratifica que los países de la UE tienen una relación de U invertida entre sus niveles de ingreso (PIB per cápita) y los niveles de contaminación (emisiones de CO₂ y gas invernadero).

Figura 3. Curva medioambiental de Kuznets (CMK) para el Dióxido de Carbono (CO₂) y gas invernadero en los países de la Unión Europea.



Fuente: elaboración propia, con base en los datos del Banco Mundial.

Conclusiones

Cabe resaltar que con este tipo de trabajos no solamente se busca a contribuir al análisis de los impactos del crecimiento económico en la contaminación ambiental; por el contrario, se pretende determinar si realmente el desarrollo de las economías a través de cambios en su estructura productiva, tecnologías limpias y el desarrollo de políticas de regulación ambiental; y más aún, sin una estructura formal, puede contribuir a un análisis general de esta problemática, a pesar de establecer una relación empírica que puede ser sesgada.

Los resultados obtenidos comprueban la existencia de la curva medioambiental de Kuznets (CMK) para las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y gas invernadero en los países de la Unión Europea. Así mismo, presenta puntos de inflexión implícitos altos en materia de PIB per cápita acorde solamente a un país como Luxemburgo, debido a un bajo rendimiento decreciente en el ingreso y los niveles de contaminación. Con relación con las demás variables, el uso de energía y la población genera un efecto positivo en los indicadores de contaminación; en materia de actividad económica, solamente el sector industrial incrementa las emisiones de CO_2 y gas invernadero; y finalmente, un aumento en los gastos en educación conlleva a reducir la contaminación (solamente las emisiones de Dióxido de Carbono).

Para establecer resultados robustos, se aplica la prueba de Hausman, la cual establece si la heterogeneidad no observada (entre países y en el tiempo) está correlacionada con las variables independientes. El test muestra que el método de efecto aleatorio presenta estimadores consistentes; no obstante, puede existir diversos efectos para las diferentes sub-regiones o países. Para ello, es pertinente realizar varias estimaciones. Igualmente, se realiza el test de Wald y Wooldridge, los cuales establecen la presencia de heterocedasticidad y autocorrelación serial. Para controlar estos problemas, se emplea el método de efectos fijos robustos. Los resultados muestran una similitud con el modelo de efectos fijos, reafirmando la presencia de la CMK en los países de la Unión Europea.

Para finalizar, se debe destacar que la solución de esta problemática no solo debe basarse en un diagnóstico; lo importante es mejorar, no solamente la estructura formal para determinar este tipo de problemáticas, sino que también se debe enfocar que esté tipo de análisis haga parte de la política económica de las regiones. En el caso de la UE, la aplicación de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) en la Agenda 2030 es un avance en este tipo de lineamientos para una problemática que hace tiempo dejó de ser individual y que ahora necesita del trabajo conjunto.

Referencias

- Ahmed, A., Uddin, G. & Sohag, K. (2016). Biomass energy, technological progress and the environmental Kuznets curve: Evidence from selected European countries. *Biomass and Bioenergy*, 90, 202-208. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.04.004>
- Altintas, H. & Kassouri, Y. (2020). Is the environmental Kuznets Curve in Europe related to the per-capita ecological footprint or CO₂ emissions? *Ecological Indicators*, 113, 106187. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106187>
- Boubellouta, B. & Brandt, S. (2020). Testing the environmental Kuznets Curve hypothesis for E-waste in the EU28+2 countries. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123371. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123371>
- Bruyn, S., Van den Bergh, J. & Opschoor, J. (1998). Economic growth and emissions: reconsidering the empirical basis of environmental Kuznets curves. *Ecological Economics*, 25(2), 161-175. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(97\)00178-X](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(97)00178-X)
- Comisión Europea. (2020). *Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/sustainable-development-goals/eu-and-united-nations-common-goals-sustainable-future_es
- Filippidis, M., Tzouvanas, P. & Chatziantoniou, I. (2021). Energy poverty through the lens of the energy-environmental Kuznets curve hypothesis. *Energy Economics*, 100, 105328. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105328>
- Grossman, G. & Krueger, A. (1991). *Environmental Impact of a North American Free Trade Agreement*. National Bureau of Economic Research.
- Grossman, G. & Krueger, A. (1995). Economic Growth and the Environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353-377. <https://doi.org/10.2307/2118443>
- Kuznets, S. (1955). Economic Growth and Income Inequality. *American Economic Review*, 45(1), 1-28. <https://assets.aeaweb.org/asset-server/files/9438.pdf>

- Lieb, C. (2003). *The Environmental Kuznets Curve: A Survey of the Empirical Evidence and of Possible Cause*. University of Heidelberg.
- Ma, X., Ahmad, N. & Oei, P. (2021). Environmental Kuznets Curve in France and Germany: Role of Renewable and Nonrenewable Energy. *Renewable Energy*, 172, 88-99. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.014>
- Pablo-Romero, M. & Sánchez-Braza, A. (2017). Residential Energy Environmental Kuznets Curve in the EU-28. *Energy*, 125, 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.091>
- Pejovic, B., Karadzic, V. & Backovic, T. (2021). Economic growth, energy consumption and CO2 Emissions in the countries of the European union and the Western Balkans. *Energy Reports*, 7, 2775-2783. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.05.011>
- Pontarollo, N. & Serpieri, C. (2020). *Testing the Environmental Kuznets Curve hypothesis on land use: The case of Romania*. Land Use Policy.
- Raza, S. A. & Shah, N. (2018). Testing environmental Kuznet curve hypothesis in G7 countries: the role of renewable energy consumption and trade. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 26965-26977. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2673-z>
- Shafik, N. & Bandyopadhyaya, S. (1992). Economic Growth and Environmental Quality Time-Series and Cross-Country Evidence. *Policy Research Working Paper Series, 904*. The World Bank.
- Sharman, G. D., Tiwari, A. K., Erkut, B. & Mundi, H. S. (2021). Exploring the nexus between non-renewable an renewable energy consumptions and economic development: Evidence from panel estimations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111152. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111152>
- Stern, D. & Common, M. (2001). Is there an environmental Kuznets curve for sulphur? *Journal of Environmental Economics and Management*, (41), 162-178. <https://doi.org/10.1006/jeem.2000.1132>

Gómez, C. F., Cerquera, Ó. H. y Rojas, L. (2024). Europa y la curva medioambiental de Kuznets: un avance hacia una economía sostenible.

Ánfora, 31(56), 258-278. <https://doi.org/10.30854/anfv31.n56.2023.923>



Wooldridge, J. M. (2015). *Introductory Econometrics: A Modern Approach*. En J. M. Wooldridge, *Introductory Econometrics: A Modern Approach* (Fifth Edition ed.). Cengage Learning.

World Bank. (2020). *Datos de libre acceso*. <https://datos.bancomundial.org/>