

Análisis de la Curva de Kuznets Ambiental (cka) en Perú: Relación entre Crecimiento de la Economía y Emisiones de CO₂ (1990-2023)

Analysis of the Environmental Kuznets Curve (ekc) in Peru: Relationship between Economic Growth and CO₂ Emissions (1990-2023)

Antony Condori Tapia¹  & Susy Leon Lara^{2*} 

¹Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, Cusco, Perú

²Universidad Andina del Cusco, Cusco, Perú

Correo de correspondencia: 023300148h@uandina.edu.pe

Resumen

El presente trabajo analiza la relación entre el crecimiento de la economía y la sostenibilidad ambiental en Perú durante el período 1990-2023, enmarcado en el campo de la economía ambiental. El objetivo principal es evaluar la validez de la hipótesis de la Curva de Kuznets Ambiental (CKA), la cual postula una relación en forma de U invertida entre el ingreso per cápita y la degradación ambiental. Para ello, se emplearon datos del Banco Mundial y métodos estadísticos como Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO), pruebas de estacionariedad (Dickey-Fuller) y causalidad (Granger). Los resultados revelaron una correlación lineal positiva fuerte (0.966) entre el PBI per cápita y las emisiones de CO₂, indicando que el crecimiento de la economía en Perú continúa asociado a mayores emisiones, sin evidencia de causalidad en ninguna dirección. Esto se atribuye a la dependencia de sectores intensivos en carbono y a un PBI per cápita (USD 7,000 en 2023) insuficiente para alcanzar el punto de inflexión estimado en USD 10,856.91. El estudio concluye que Perú se encuentra en la fase ascendente de la CKA, sin señales de desacople entre crecimiento y emisiones, lo que cuestiona la aplicabilidad automática de la hipótesis en contextos de desarrollo y resalta la necesidad de políticas ambientales proactivas.

Palabras claves: Crecimiento de la economía, curva de kuznets ambiental, emisiones de CO₂, Perú, sostenibilidad.

Citación: Condori Tapia, A., Leon Lara, S. (2025). Análisis de la Curva de Kuznets Ambiental (cka) en Perú: Relación entre Crecimiento de la Economía y Emisiones de CO₂ (1990-2023). *TRASCENDER*, 3(2), 01 - 14. [https://doi](https://doi.org/10.24265/trascender.v3i2.01-14)

Recibido: 13/08/2025

Aceptado: 27/10/2025



© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista TRASCENDER PERÚ de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.

Abstract

This paper analyzes the relationship between economic growth and environmental sustainability in Peru during the period 1990-2023, within the field of environmental economics. The main objective is to evaluate the validity of the Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis, which posits an inverted U-shaped relationship between per capita income and environmental degradation. To this end, data from the World Bank and statistical methods such as Ordinary Least Squares (OLS), stationarity tests (Dickey-Fuller), and causality tests (Granger) were used. The results revealed a strong positive linear correlation (0.966) between per capita GDP and CO₂ emissions, indicating that economic growth in Peru continues to be associated with higher emissions, with no evidence of causality in either direction. This is attributed to dependence on carbon-intensive sectors and a per capita GDP (USD 7,000 in 2023) that is insufficient to reach the estimated inflection point of USD 10,856.91. The study concludes that Peru is in the ascending phase of the EKC, with no signs of decoupling between growth and emissions, which calls into question the automatic applicability of the hypothesis in development contexts and highlights the need for proactive environmental policies.

Keywords: *Economic growth, environmental Kuznets curve, CO₂ emissions, Peru, sustainability.*

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la economía y su impacto en el medio ambiente constituyen un tema de creciente relevancia global, especialmente en países en desarrollo como Perú, donde la expansión de sectores intensivos en carbono, como la minería y la energía, han generado un aumento sostenido en las emisiones de CO₂. Este escenario plantea un problema crítico: ¿es posible conciliar el desarrollo económico con la sostenibilidad ambiental, o el crecimiento perpetúa inevitablemente la degradación ecológica? La hipótesis de la Curva de Kuznets Ambiental (CKA) ofrece un marco teórico para analizar esta relación, al proponer que, tras alcanzar un umbral de ingreso per cápita, los países reducen su contaminación (Grossman & Krueger, 1991, como se citó en Jimenez et al. 2019). Sin embargo, su aplicabilidad en economías en desarrollo ha sido cuestionada por autores como Zilio (2012), quien argumenta que factores estructurales e institucionales pueden impedir este desacople.

Objetivo

Evaluar la validez de la hipótesis de la Curva de Kuznets Ambiental (CKA) en Perú durante el período 1990-2023, analizando la relación entre el crecimiento de la economía (medido por el PBI per cápita) y las emisiones de dióxido de carbono (CO₂). El estudio busca determinar si Perú sigue la trayectoria teórica de la CKA (relación en forma de U invertida) o si, por el contrario, persiste una relación lineal positiva

entre ambas variables, considerando factores como la dependencia de sectores intensivos en carbono y el nivel de ingreso per cápita del país. La relevancia de esta investigación radica en su contribución al debate sobre modelos de desarrollo sostenible en América Latina, una región poco representada en la literatura global acerca de la CKA. Además, los hallazgos existentes sobre la relación entre emisiones de CO₂ y crecimiento de la economía sugieren que este vínculo es complejo y varía según el contexto, lo que refuerza la necesidad de políticas adaptadas que equilibren la protección ambiental con el desarrollo económico (Segarra & Olivera, 2021).

MARCO TEÓRICO - CONCEPTUAL

Curva de Kuznets ambiental

De acuerdo a Simbi et al. (2024) la Hipótesis de la Curva de Kuznets Ambiental (CKA) establece una relación no lineal entre el crecimiento de la economía y la calidad ambiental.

Originalmente inspirada en la curva de Kuznets que describe la relación entre el ingreso y la desigualdad económica, la CKA sugiere un patrón en forma de U invertida: la degradación ambiental inicialmente empeora a medida que las economías se desarrollan, pero finalmente mejora a medida que los ingresos continúan aumentando (Schneider & Mellon, 2025).

A pesar de su atractivo conceptual, la validez empírica de la CKA ha sido objeto de un intenso debate, con hallazgos mixtos y a menudo contradictorios en la literatura (Zheng et al., 2024).

Crecimiento económico

El crecimiento de la economía se entiende como el aumento en el ingreso per cápita de un país y es el factor central para analizar su impacto en la calidad ambiental (Stern et al., 1996).

El crecimiento de la economía se mide típicamente utilizando el Producto Bruto Interno (PBI) per cápita. Este indicador busca representar el nivel de desarrollo económico y la afluencia de una nación (Pao & Tsai, 2011).

Según Barra et al. (2025) un mayor ingreso permite una mayor inversión en investigación y desarrollo (I+D) y la adopción de tecnologías más limpias y eficientes.

De acuerdo a su análisis Beckerman (1992) determina que, el crecimiento de la economía no resolverá todos los problemas ambientales por sí mismo; se necesitarán políticas para abordar problemas serios y difíciles, como la contaminación local y global.

Contaminación ambiental

En el contexto de la Hipótesis de la Curva de Kuznets Ambiental (CKA), la contaminación ambiental se refiere a la degradación del medio ambiente que resulta de la actividad económica (Jalil & Mahmud, 2009).

En el contexto de la Curva de Kuznets Ambiental, se estudia en profundidad el dióxido de carbono como uno de los contaminantes más relevantes y se considera responsable de más del 50% del calentamiento global (Roberts & Grimes, 1997).

De acuerdo a Holtz & Selden (1995) el crecimiento de las emisiones globales de CO₂ se proyecta en 1.8% anual en el futuro previsible, impulsado por el rápido crecimiento de la producción y la población en naciones de bajos ingresos con alta propensión marginal a emitir CO₂.

Punto de inflexión (Turning point)

Shahbaz et al. (2013) estimó la existencia de la Curva de Kuznets Ambiental (CKA) con un punto de inflexión del ingreso real per cápita de USD 625.

En China, se encontró una relación de U invertida entre las emisiones de dióxido de carbono a nivel de ciudad y el PBI per cápita. La investigación calculó que el punto de inflexión del PIB per cápita es de 139.8 mil yuanes (USD 19,472.92 aproximadamente) (Zheng et al., 2024).

En países de la OCDE, la eficiencia ambiental tendió a disminuir en las etapas iniciales de crecimiento y luego a aumentar una vez que se alcanzó un nivel crítico de ingreso de USD 16,000 (Chakravarty & Mandal, 2020)

De acuerdo a Destek et al. (2024) en su análisis el punto de inflexión de un panel data en el rango de USD 4,041 a USD 5,127, en el cual se observa que Omán, Kazajistán y Arabia Saudita han superado este umbral, mientras que la República Democrática del Congo y la República del Congo están muy por debajo. Irak, Mongolia, Irán y Azerbaiyán se encuentran cerca de los niveles de umbral.

Innovación y Desarrollo

De acuerdo a Petrović & Lobanov (2020), a diferencia de lo que se pensaba, algunos estudios revelan que el impacto del gasto en I+D sobre las emisiones de CO₂ puede ser positivo o negativo a largo plazo y no se observa en cerca del 40% de los países analizados de la OCDE.

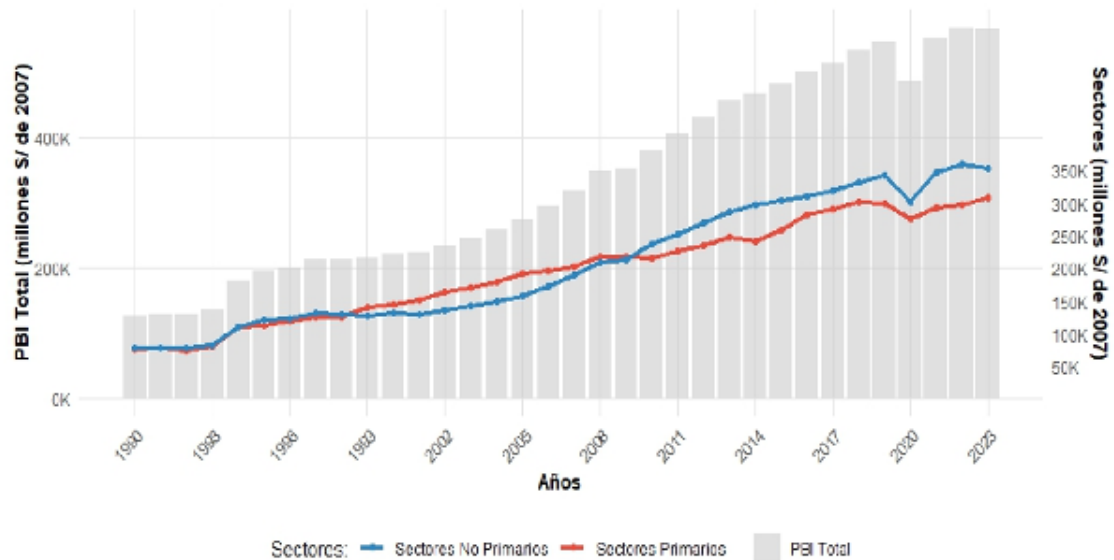
En territorios con alta contaminación y alta incertidumbre en la política económica, el consumo de energía renovable y el I+D pueden tener una influencia positiva y considerable en las emisiones de carbono, lo que sugiere que la innovación podría estancarse o no ser efectiva bajo estas condiciones (Vitenu & Acheampong, 2022).

Entre 1990 y 2023, el Perú experimentó un significativo crecimiento

de la economía, impulsado principalmente por el sector minero, que registró una de las expansiones más pronunciadas y sostenidas del período. Como se observa en la Figura 1, su trayectoria ascendente refleja la dependencia de la economía peruana de la extracción de recursos naturales no renovables, como minerales e hidrocarburos. Este sector se caracteriza por su alta contribución al PBI, su intensivo consumo energético, sus elevadas emisiones de CO₂ y una limitada capacidad de generación de empleo.

Figura 1

Análisis del crecimiento de la economía por sectores en millones de soles (1990-2023)



Nota: Elaborado en base a datos del BCRPData, datos anuales del PBI y los sectores productivos primarios y no primarios del año 1990 al 2023 (Series de tiempo) / datos medidos en (millones S/ de 2007).

METODOLOGÍA

Este estudio empleó un enfoque cuantitativo con diseño no experimental basado en series de tiempo, utilizando datos anuales del Banco Mundial para el período 1990-2023. Se analizó la relación entre el PBI per cápita y las emisiones de CO₂ en Perú, siguiendo los postulados teóricos de la Curva de Kuznets Ambiental (Grossman & Krueger, 1991).

El proceso metodológico y estadístico se realiza a través de un análisis econométrico mediante el cual se evaluó el comportamiento y dinámica entre el crecimiento y las emisiones de dióxido de carbono. Los hallazgos, si bien a menudo revelan el apoyo a la hipótesis de la CKA, también destacan la importancia de considerar el contexto específico de cada país o región, así como la inclusión de diversas variables explicativas y moderadoras para obtener una visión más completa y robusta de estas relaciones (Kaika & Zervas, 2013).

Al tratarse de series temporales completas, el “muestreo” también puede realizarse mediante una selección de las unidades (países, regiones, ciudades) para

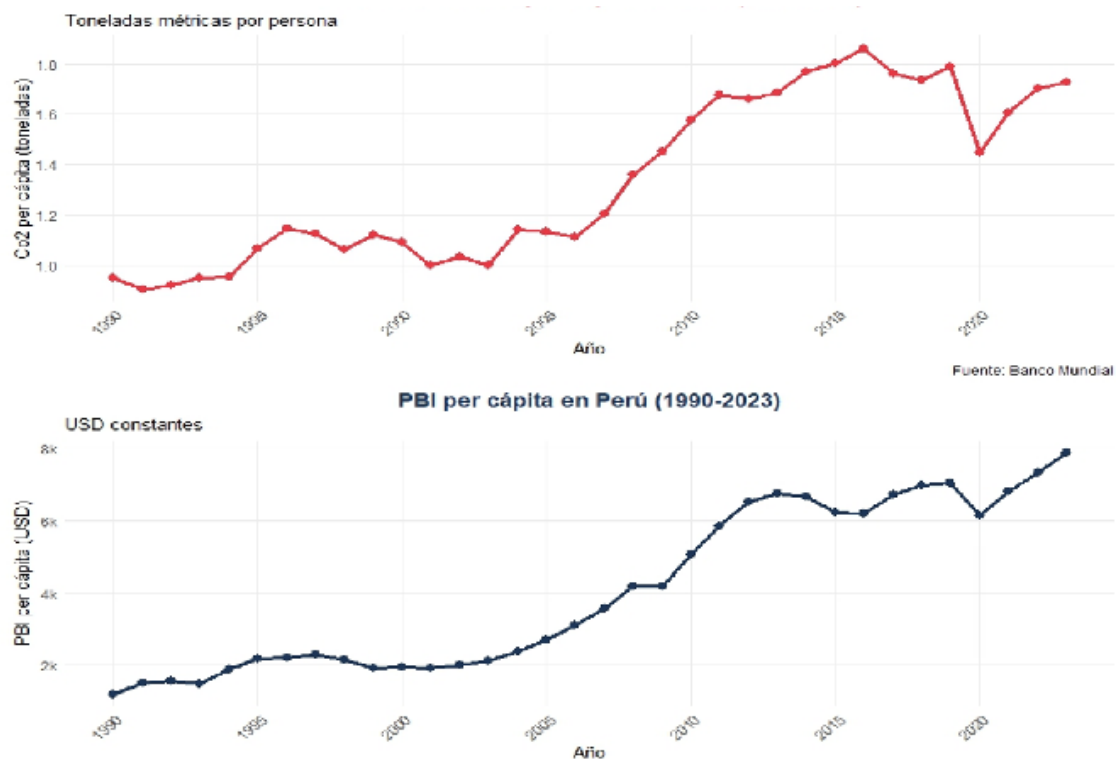
las cuales se dispone de datos completos y fiables para el período de estudio deseado (Odei et al., 2025). Este enfoque permitió evaluar rigurosamente la hipótesis de la CKA en el contexto peruano, combinando técnicas estadísticas clásicas con análisis específicos para series de tiempo.

RESULTADOS

Según el análisis, en Perú (1990-2023), existe una fuerte correlación lineal positiva entre las emisiones de CO₂ y el PBI per cápita, con un coeficiente de correlación de Pearson que asciende a 0.966 (ver Figura 2).

Figura 2

Relación lineal entre PBI per cápita y emisiones de CO₂ en Perú (1990-2023)

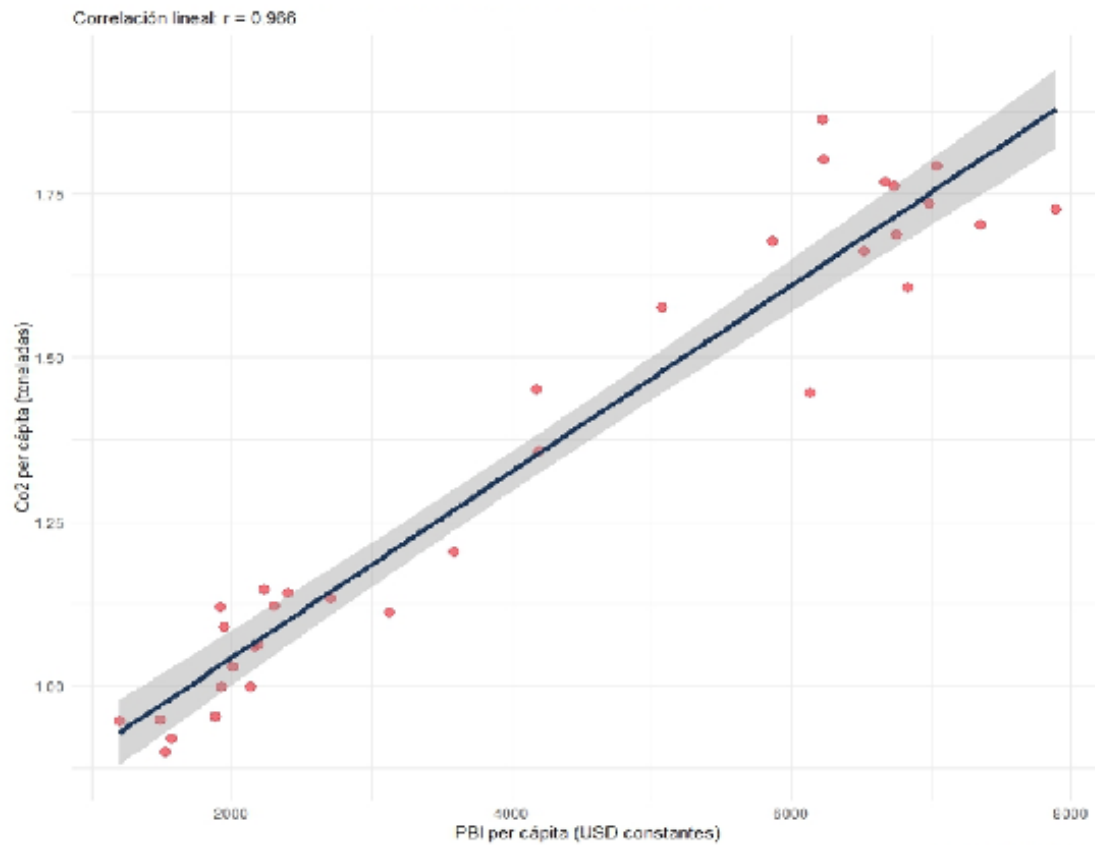


Nota: Elaborado en base a datos del banco mundial (WorldBank), datos anuales del 1990 al 2023 (Series de tiempo).

De acuerdo al análisis de correlación a través del índice de correlación, que mide la relación lineal entre dos variables. Coeficiente de correlación positiva fuerte entre PBI y CO₂, tal como indica Raihan & Tuspekova (2022). Lo cual representa que, a mayor PBI per cápita, mayores emisiones. Bajo el modelo de análisis de MCO para series de tiempo. Este hallazgo contradice la hipótesis inicial de la Curva de Kuznets Ambiental (CKA), que postula una relación en forma de U invertida. Demostrada también por Narayan et al. (2016) quienes analizaron una muestra de 181 países y encontró evidencia de la CKA en forma de U invertida solo para 21 países, mientras que para otros 49, el crecimiento del ingreso reducirá las emisiones en el futuro. Específicamente, solo cuatro países de altos ingresos (Dinamarca, Islandia, Países Bajos, Estados Unidos) mostraron la relación en U invertida.

```
> # Correlación entre variables
> cor(data_ck$gdp_pc, data_ck$co2_pc, use = "complete.obs")
[1] 0.9659528
```

Figura 3
Análisis de Correlación gráfica



Nota: Elaborado en base a datos del banco mundial (WorldBank), datos anuales del 1990 al 2023 (Series de tiempo).

Para determinar el control sobre el modelo: $Pbi\ percapita = f(CO_2\ percapita)$, se plantean pruebas de normalidad, estacionariedad y causalidad. Siendo las variables de análisis Pbi percapita, CO_2 percapita.

Pruebas de normalidad, a través de Shapiro-Wilk normality test

Según las Hipótesis nula (H_0): Los residuos siguen una distribución normal (> 0.05). Hipótesis alterna (H_i): Los residuos no siguen una distribución normal (< 0.05). Se tiene un $p\text{-value} = 0.8524 > 0.05$: Se acepta H_0 .

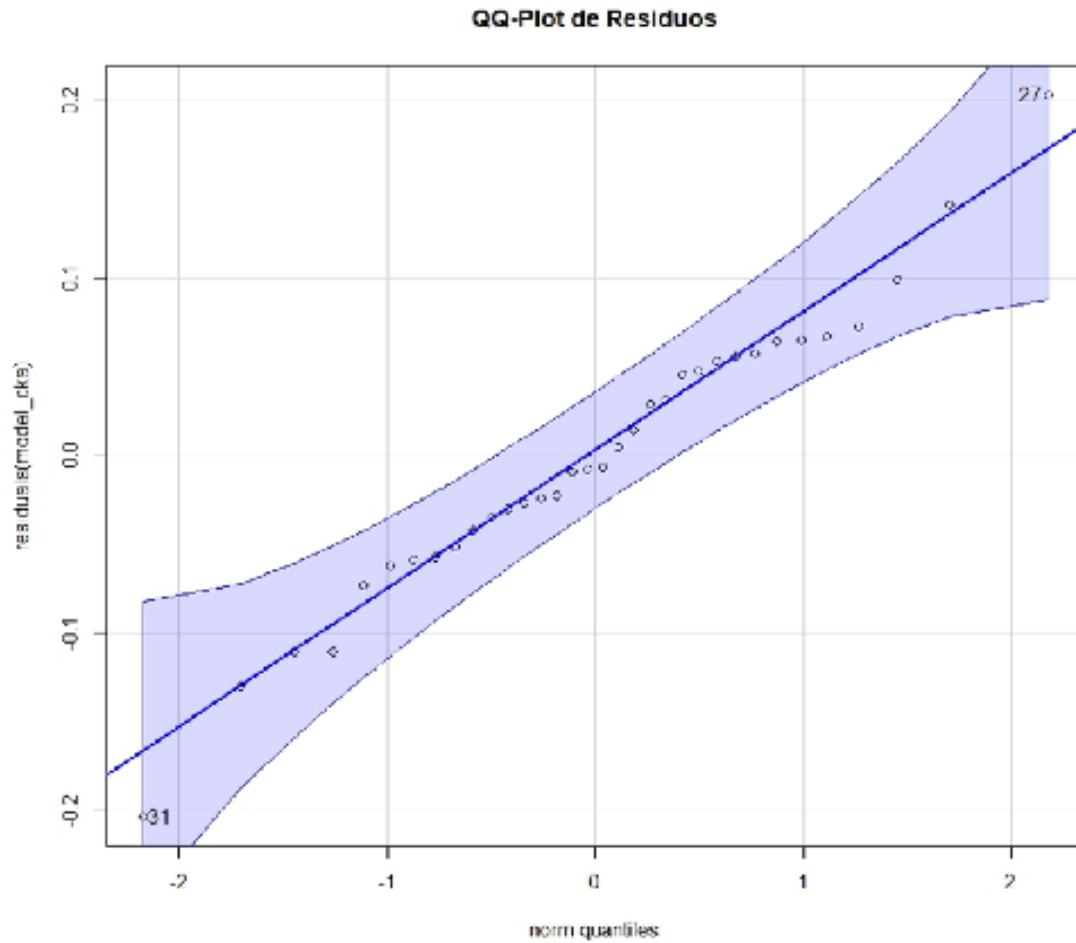
```
> shapiro.test(residuals(model_cka)) # Si p-value > 0.05, residuos normales

shapiro-wilk normality test

data: residuals(model_cka)
W = 0.98267, p-value = 0.8524
```

Figura 4

Análisis de Residuos de las variables Pbi percapita, CO₂ percapita



Nota: Elaborado en base a datos del banco mundial (WorldBank), datos anuales del 1990 al 2023 (Series de tiempo).

Los residuos del modelo de la CKA sí son normales, lo que valida el uso de métodos estadísticos paramétricos.

Pruebas de Estacionariedad, a través del test de Dickey Fuller

Según las Hipótesis nula (H_0): La serie en diferencias tiene una raíz unitaria (no es estacionaria) (> 0.05). Hipótesis alternativa (H_1): La serie en diferencias es estacionaria. (< 0.05). Se tiene un p-value = 0.8524 > 0.05 : Se acepta H_0 .

```
> #4.2. Estacionariedad (Dickey-Fuller)
>
> adf.test(data_ck$co2_pc) # Prueba para CO2

Augmented Dickey-Fuller Test

data: data_ck$co2_pc
Dickey-Fuller = -2.5333, Lag order = 3, p-value = 0.3664
alternative hypothesis: stationary

> adf.test(data_ck$gdp_pc) # Prueba para PIB
```

```

Augmented Dickey-Fuller Test

data: data_ck$gdp_pc
Dickey-Fuller = -1.7387, Lag order = 3, p-value = 0.6742
alternative hypothesis: stationary

```

Estacionariedad en diferencias, a través del test de Augmented Dickey Fuller.

De acuerdo al estadístico Dickey-Fuller: -1.9956 (valor crítico más bajo que el umbral estándar para rechazar H_0). Con un p-value = 0.5746; Como p-value > 0.05, se acepta H_0 . La primera diferencia del PBI per cápita sigue siendo no estacionaria.

```

> #estacionariedad en diferencias
> adf.test(diff(data_ck$gdp_pc, differences = 1)) # Ver

Augmented Dickey-Fuller Test

data: diff(data_ck$gdp_pc, differences = 1)
Dickey-Fuller = -1.9956, Lag order = 3, p-value = 0.5746
alternative hypothesis: stationary

```

Causalidad, a través de la prueba (test) de Granger causality (Causalidad de Granger).

De acuerdo al test de Granger y bajo la Hipótesis nula (H_0): La variable X no causa Granger a Y. Hipótesis alternativa (H_1): La variable X causa Granger a Y. Los resultados son un p-value > 0.05 en ambos test: No hay evidencia de causalidad en ninguna dirección.

```

> grangertest(co2_pc ~ gdp_pc, order = 2, data = data_ck) # ¿PIB causa CO2?
Granger causality test

Model 1: co2_pc ~ Lags(co2_pc, 1:2) + Lags(gdp_pc, 1:2)
Model 2: co2_pc ~ Lags(co2_pc, 1:2)
  Res.Df Df      F Pr(>F)
1      27
2      29 -2  2.3002 0.1196
> grangertest(gdp_pc ~ co2_pc, order = 2, data = data_ck) # ¿CO2 causa PIB?
Granger causality test

Model 1: gdp_pc ~ Lags(gdp_pc, 1:2) + Lags(co2_pc, 1:2)
Model 2: gdp_pc ~ Lags(gdp_pc, 1:2)
  Res.Df Df      F Pr(>F)
1      27
2      29 -2  0.3238 0.7262

```

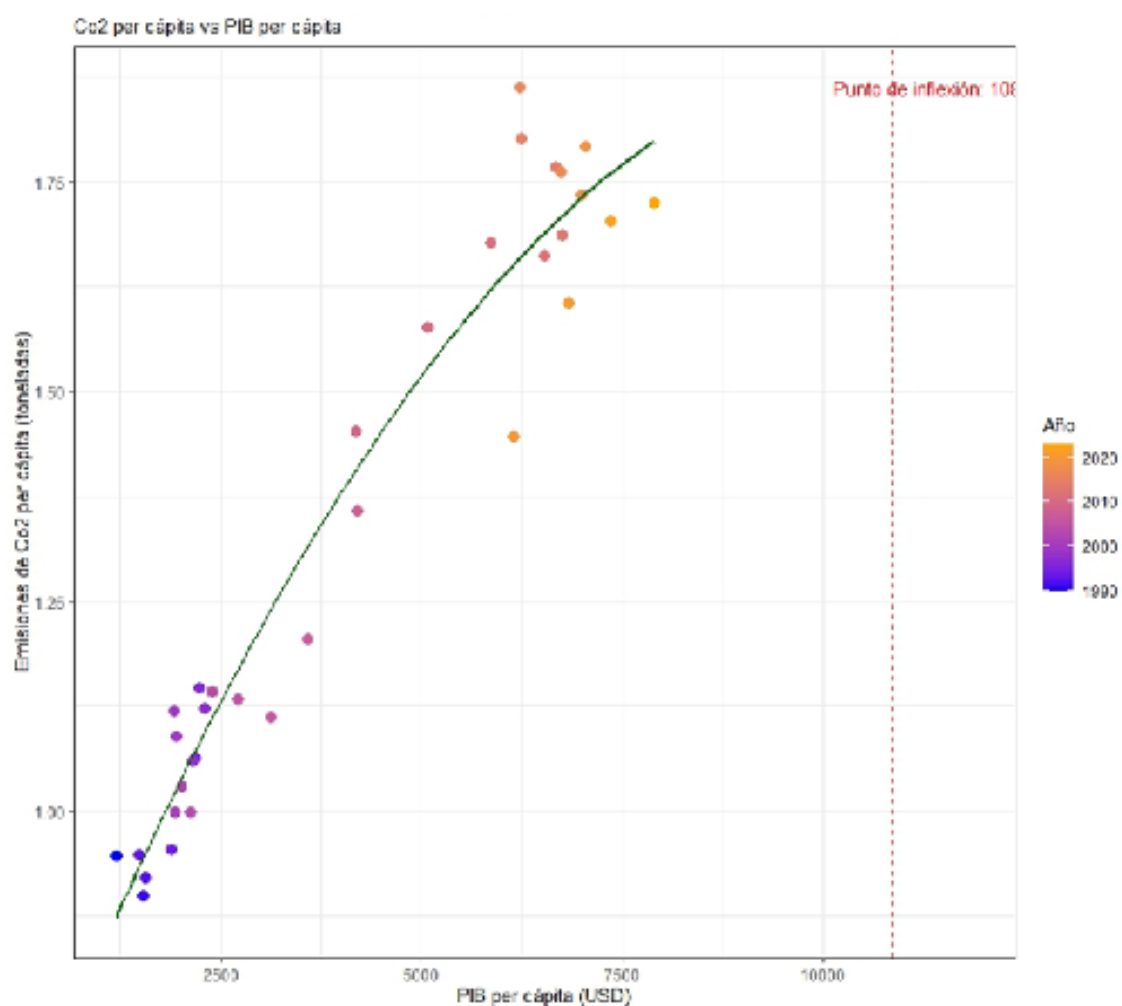
El PBI per cápita no causa estadísticamente las emisiones de dióxido de carbono, ni viceversa, bajo el modelo especificado (2 retardos). Del mismo modo Acheampong (2018) identifica ausencia de causalidad del crecimiento sobre las emisiones de CO₂ a nivel regional, se ha encontrado que, con la excepción de las muestras global y de América Latina y el Caribe, el crecimiento de la economía no afecta de manera causal las emisiones de CO₂.

Curva de Kuznets ambiental en el Perú

Según la CKA, Perú debería comenzar a reducir sus emisiones de CO₂ al superar este umbral de ingreso. Sin embargo; el PBI per cápita actual (2023) \approx USD 7,000 (Banco Mundial) está muy por debajo del punto crítico. Habiendo validado el modelo preliminar se genera el umbral o punto de inflexión el cual determina el cambio mediante al cual hacen mención los autores en el análisis de la CKA. El Perú todavía está en la parte ascendente de la curva, donde el crecimiento de la economía está vinculado a un aumento en las emisiones. De acuerdo a la estimación el punto de inflexión para el Perú se podría alcanzar aproximadamente a partir de USD. 10,856.91.

Figura 5

Curva de Kuznets ambiental para el Perú (1990 – 2023)



Nota: Elaborado en base a datos del banco mundial (WorldBank), datos anuales del 1990 al 2023 (Series de tiempo).

DISCUSIÓN

Los hallazgos son coherentes con los pronosticados por Erazo et al. (2024), quienes proponen que la economía peruana se encuentra en la fase inicial de la curva ambiental de Kuznets.

De acuerdo a Zilio (2012) sostiene que, si bien la Curva de Kuznets Ambiental (CKA) postula una relación en forma de U invertida donde el daño ambiental primero aumenta y luego disminuye con el ingreso, sus fundamentos teóricos no son operativos ni aplicables en las condiciones económicas, sociales e institucionales de los países en crecimiento. Esta limitación, que consideramos válida, puede atribuirse a una compleja interacción de factores geográficos, políticos, económicos y a la propia estructura de la concentración económica.

Coincidimos con Molero et al. (2021), en su conclusión de que la relación entre el producto y la degradación ambiental sigue un modelo creciente y monótono. En países en desarrollo, la CKA pierde gran parte de su validez debido a la inequidad en la distribución del ingreso y a la fragilidad del marco institucional en el ámbito medioambiental. Por lo cual no debería asociarse a mayor crecimiento el hecho de recién invertir en una política medio ambiental.

En el caso peruano, la dependencia de sectores extractivos (no primarios) son también los impulsores clave del crecimiento de la economía durante el período de estudio, explica en gran medida la fase ascendente de la curva. Esto coincide con lo señalado por (Beckerman, 1992) quien advierte que el crecimiento de la economía, no necesariamente se traduce en mejoras ambientales automáticas.

CONCLUSIONES

- Perú no ha logrado el punto de inflexión (turning point) de la curva de Kuznets. El crecimiento de la economía tiene correlación con mayores emisiones de CO₂.
- No hay causalidad Granger entre PBI y CO₂, lo que cuestiona la hipótesis de que el crecimiento automáticamente reducirá la contaminación.
- La estrategia de “esperar y crecer” no es viable. Se requieren políticas ambientales proactivas para desacoplar crecimiento y degradación ambiental.

Referencias

- Acheampong, A. O. (2018). Economic growth, CO2 emissions and energy consumption: What causes what and where? *Energy Economics*, 74, 677-692. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.07.022>
- Barra, C., Falcone, P. M., & Giganti, P. (2025). Exploring the impact of economic, climate, and energy policy uncertainty on the Environmental Kuznets Curve: International evidence. *International Economics*, 182, 100592. <https://doi.org/10.1016/j.inteco.2025.100592>
- Beckerman, W. (1992). Economic growth and the environment: Whose growth? whose environment? *World Development*, 20(4), 481-496. [https://doi.org/10.1016/0305-750X\(92\)90038-W](https://doi.org/10.1016/0305-750X(92)90038-W)
- Chakravarty, D., & Mandal, S. K. (2020). Is economic growth a cause or cure for environmental degradation? Empirical evidences from selected developing economies. *Environmental and Sustainability Indicators*, 7, 100045. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100045>
- Destek, M. A., Saha, T., Destek, G., & Sinha, A. (2024). The resource-based Kuznets curve hypothesis: An empirical exploration. *Geoscience Frontiers*, 15(5), 101841. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2024.101841>
- Erazo, M. R., Cubos-Sifuentes, U., Mejia-Avalos, M. R., & Ramirez-Santana, A. L. (2024). La curva de Kuznets ambiental de Perú 2010-2020: Una visión departamental. *Revista Kawsaypacha: Sociedad y Medio Ambiente*, 14, D-005. <https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202402.D005>
- Grossman, G., & Krueger, A. (1991). *Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement* (No. w3914; p. w3914). National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w3914>
- Holtz-Eakin, D., & Selden, T. M. (1995). Stoking the fires? CO2 emissions and economic growth. *Journal of Public Economics*, 57(1), 85-101. [https://doi.org/10.1016/0047-2727\(94\)01449-X](https://doi.org/10.1016/0047-2727(94)01449-X)
- Jalil, A., & Mahmud, S. F. (2009). Environment Kuznets curve for CO2 emissions: A cointegration analysis for China. *Energy Policy*, 37(12), 5167-5172. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.07.044>
- Jimenez, C., Moncada, L., Ochoa-Jimenez, D., & Ochoa-Moreno, W.-S. (2019). Kuznets Environmental Curve for Ecuador: An Analysis of the Impact of Economic Growth on the Environment. *Sustainability*, 11(21), 5896. <https://doi.org/10.3390/su11215896>

- Kaika, D., & Zervas, E. (2013). The Environmental Kuznets Curve (EKC) theory-Part A: Concept, causes and the CO₂ emissions case. *Energy Policy*, 62, 1392-1402. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.131>
- Molero, L. E. M., Andino, T. S. A., Parraga, M. I. P., Alava, H. E. Á., & Bejarano, H. F. B. (2021). Curva de Kuznets Ambiental y determinantes de las emisiones de CO₂ en Ecuador: Un enfoque de cointegración: Environmental Kuznets Curve and determinants of CO₂ emissions in Ecuador: a cointegration approach. *South Florida Journal of Development*, 2(5), 6453-6474. <https://doi.org/10.46932/sfjdv2n5-014>
- Narayan, P. K., Saboori, B., & Soleymani, A. (2016). Economic growth and carbon emissions. *Economic Modelling*, 53, 388-397. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2015.10.027>
- Odei, S. A., Dunyo, S. K., & Anderson, H. J. (2025). Research and development, economic growth, CO₂ emissions and environmental Kuznets curve. *Sustainable Futures*, 9, 100541. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100541>
- Pao, H.-T., & Tsai, C.-M. (2011). Modeling and forecasting the CO₂ emissions, energy consumption, and economic growth in Brazil. *Energy*, 36(5), 2450-2458. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.032>
- Petrović, P., & Lobanov, M. M. (2020). The impact of R&D expenditures on CO₂ emissions: Evidence from sixteen OECD countries. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119187. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119187>
- Raihan, A., & Tuspekova, A. (2022). The nexus between economic growth, renewable energy use, agricultural land expansion, and carbon emissions: New insights from Peru. *Energy Nexus*, 6, 100067. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100067>
- Roberts, J. T., & Grimes, P. E. (1997). Carbon intensity and economic development 1962–1991: A brief exploration of the environmental Kuznets curve. *World Development*, 25(2), 191-198. [https://doi.org/10.1016/S0305-750X\(96\)00104-0](https://doi.org/10.1016/S0305-750X(96)00104-0)
- Schneiter, P., & Mellon-Bedi, S. (2025). The Environmental Kuznets Curve Revisited: A Spatial Panel Model with Heterogeneous Coefficients. *Energy Economics*, 143, 108237. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108237>
- Segarra, V., & Olivera, M. (2021). Calidad ambiental y crecimiento de la economía: Análisis dinámico para América Latina y el Caribe. *Revista de Economía del Rosario*, 24(2), 1-40. <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/economia/a.10514>

- Shahbaz, M., Mutascu, M., & Azim, P. (2013). Environmental Kuznets curve in Romania and the role of energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 165-173. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.012>
- Simbi, C. H., Yao, F., Zhang, J., Tenaw, D., Sugira Murekezi, J., Magati, M. T., Hirwa, H., Al-Sakkaf, A. S., Kayiranga, A., & Peng, J. (2024). Balancing growth and preservation: Unravelling Africa's carbon-economic nexus through the environmental kuznets curve. *Heliyon*, 10(20), e39269. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39269>
- Stern, D. I., Common, M. S., & Barbier, E. B. (1996). Economic growth and environmental degradation: The environmental Kuznets curve and sustainable development. *World Development*, 24(7), 1151-1160. [https://doi.org/10.1016/0305-750X\(96\)00032-0](https://doi.org/10.1016/0305-750X(96)00032-0)
- Vitenu, P. A., & Acheampong, T. (2022). Impact of economic policy uncertainty, energy intensity, technological innovation and R&D on CO2 emissions: Evidence from a panel of 18 developed economies. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(58), 87426-87445. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21729-2>
- Zheng, X., Wang, J., Xu, X., Yu, R., & Zhang, S. (2024). Carbon Kuznets curve in China: Nighttime light analysis in prefecture-level cities. *Heliyon*, 10(16), e36312. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36312>
- Zilio, M. I. (2012). Curva de Kuznets ambiental: La validez de sus fundamentos en países en desarrollo. *Cuadernos de Economía*, 35(97), 43-54. [https://doi.org/10.1016/S0210-0266\(12\)70022-5](https://doi.org/10.1016/S0210-0266(12)70022-5)