



NOTAS DE Población

JULIO-DICIEMBRE
2025

AÑO LII

Nº 121

ISSN 0303-1829

Impactos de la estructura etaria en las emisiones
de CO₂ en el Brasil (2002-2016)

Jamaika Prado, Alain Hernández Santoyo y Thiago Costa Soares

Fecha de publicación: 30/09/2025

Publicación de las Naciones Unidas
LC/PUB.2025/15-P
Copyright © Naciones Unidas, 2025
Todos los derechos reservados
Impreso en Naciones Unidas, Santiago
S.2500299[S]

Las Naciones Unidas y los países que representan no son responsables por el contenido de vínculos a sitios web externos incluidos en esta publicación.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de la Organización o las de los países que representan.

Esta publicación debe citarse como: Prado, J., Hernández Santoyo, A. y Soares, T. C. (2025). Impactos de la estructura etaria en las emisiones de CO₂ en el Brasil (2002-2016). *Notas de Población* (121) (LC/PUB.2025/15-P) Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Documentos y Publicaciones, publicaciones.cepal@un.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.



NACIONES UNIDAS

CEPAL

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)
Centro Latinoamericano y Caribeño de Demografía (CELADE)-División de Población de la CEPAL

Impactos de la estructura etaria en las emisiones de CO₂ en el Brasil (2002-2016)

Jamaika Prado¹
Alain Hernández Santoyo²
Thiago Costa Soares³

Recibido: 18/02/2025
Aceptado: 01/06/2025

Resumen

El Brasil ha experimentado un envejecimiento progresivo de la población que puede impactar en la producción de bienes y servicios, el consumo de energía y, consecuentemente, las emisiones de contaminantes. Este artículo analiza los efectos de la estructura etaria en las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) asociadas al consumo de energía en el Brasil de 2002 a 2016. La dinámica demográfica se representa mediante la proporción de población en edad de trabajar (PET) en la población total. Los resultados apuntan a un efecto directo negativo a largo plazo sobre las emisiones de CO₂. Asimismo, el efecto indirecto observado, según el producto interno bruto (PIB) per cápita, es que esta proporción contribuye a reducir las emisiones hasta un umbral de 8.047 reales brasileños, a partir del cual tiende a ser positivo. En total, predomina el efecto negativo de esta proporción sobre las emisiones de CO₂ a largo plazo.

¹ Doctoranda del Programa de Postgrado en Economía de la Universidad Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora (Brasil). Correo electrónico: jamaika.prado@estudante.ufjf.br.

² Profesor Visitante del Programa de Postgrado en Desarrollo Territorial y Sistemas Agroindustriales de la Universidad Federal de Pelotas (PPGD TSA/UFPEL), Campus Capão do Leão, Capão do Leão (Brasil). Correo electrónico: alain.santoyo@ufpel.edu.br.

³ Profesor Asociado 1 del Departamento de Economía de la Universidad Federal de Juiz de Fora, Campus Governador Valadares (UFJF/GV), Governador Valadares (Brasil). Correo electrónico: thiago.costa@ufjf.edu.br.

Nota: Los autores agradecen a la Fundación de Apoyo a la Investigación del Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por el financiamiento.

Palabras clave: Composición de la población, distribución por edad, crecimiento económico, consumo de energía, emisiones de gases de efecto invernadero, modelos matemáticos, Brasil.

Abstract

Brazil's population has aged progressively, reflecting a trend that may influence the production of goods and services, energy consumption and, consequently, pollutant emissions. This article analyses the impact of age structure on carbon dioxide (CO₂) emissions associated with energy consumption in Brazil from 2002 to 2016. Population dynamics are represented by the share of the working-age population in the total population. The results indicate a negative direct effect on CO₂ emissions over the long term. Similarly, the indirect effect observed, mediated by per capita GDP, shows that this proportion contributes to reducing emissions up to a threshold of 8,047 Brazilian reais, beyond which the effect tends to become positive. Overall, the long-term effect of this proportion on CO₂ emissions is predominantly negative.

Keywords: Population composition, age distribution, economic growth, energy consumption, greenhouse gas emissions, mathematical models, Brazil.

Introducción

Desde la segunda mitad del siglo XX, el Brasil ha experimentado transformaciones significativas en su estructura poblacional que configuran el fenómeno de la transición demográfica. Este proceso se caracteriza por la reducción de las tasas de mortalidad y fecundidad, siendo el declive gradual de esta última el vector de las alteraciones en la composición etaria del país (Simões, 2016). Como consecuencia, se observa una reducción en la proporción de jóvenes y un aumento progresivo de la participación de los grupos etarios de mayor edad en la población.

El Brasil se encuentra en una etapa avanzada de la transición demográfica, definida por Simões (2016) como el “nuevo patrón demográfico”, caracterizado por una reducción gradual del crecimiento poblacional y un aumento en la proporción de personas de 60 años o más. Entre 2010 y 2022, la población creció un 6,5%, mientras que el número de personas mayores aumentó un 56%, alcanzando el 15,8% de la población total. En el mismo período, se observó una disminución en la participación del grupo de 0 a 14 años y un aumento en la población en edad de trabajar (15 a 64 años), que representaba el 69% en 2022 (IBGE, 2025a).

La actual dinámica demográfica tiene potencial para modificar los patrones y niveles de consumo de la población. Diversos estudios apuntan a que el consumo puede variar en función de la edad. En este sentido, Mao y Xu (2014) constataron que las personas jóvenes tienden a destinar una mayor parte de sus recursos a la alimentación, la educación, la cultura y el ocio. Con relación a la población de mediana edad, se aprecia una mayor propensión a gastar en vestimenta, transporte y comunicación. Por su parte, las personas mayores priorizan los gastos en alimentación, atención médica y servicios de salud. Estos datos resaltan las diferencias en las necesidades y preferencias de consumo entre los grupos etarios, lo que da lugar a patrones de consumo distintos a lo largo del curso de vida (Hassan y Salim, 2015).

Las alteraciones mencionadas en los patrones de consumo según la edad, además de influir en la estructura de la demanda, tienen implicaciones económicas y ambientales relevantes (Mao y Xu, 2014; O'Neill et al., 2010). A medida que la población envejece, se modifica el perfil de los bienes y servicios demandados, lo cual impacta en la composición sectorial de la economía y, en consecuencia, en los niveles de producción y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En este contexto, las transiciones demográficas constituyen un vector relevante en la dinámica ambiental, ya que los patrones de consumo están intrínsecamente asociados a las emisiones de GEI, tanto por las emisiones directas relacionadas con el uso de energía como por las emisiones indirectas derivadas de los procesos de producción de los bienes y servicios consumidos (Lee et al., 2021).

Con respecto a la participación sectorial en las emisiones de gases de efecto invernadero en el Brasil, los datos muestran la relevancia del sector energético, que en 2023 fue responsable de aproximadamente el 18% de las emisiones totales de GEI en el país (Sistema de Estimación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero [SEEG], 2025).

Entre 1990 y 2023, el sector registró el segundo mayor crecimiento porcentual en las emisiones, con un aumento de alrededor del 119%, superado solo por el sector de residuos. Este crecimiento contribuye al agravamiento del cambio climático, que impacta la producción, la seguridad alimentaria, el suministro de agua y la calidad de vida, representando riesgos para la sostenibilidad ambiental y la supervivencia humana (IPCC, 2013).

Ante las transformaciones demográficas en curso en el Brasil, marcadas por un cambio en la composición etaria y el envejecimiento de la población, junto con un aumento del consumo de energía y de las emisiones de GEI, se vuelve esencial comprender sus efectos directos, resultantes de los cambios en los hábitos de consumo de energía, e indirectos, relacionados con la producción de bienes y servicios, sobre las emisiones. La identificación y el análisis de estos efectos pueden contribuir a esclarecer los factores que impulsan el aumento de las emisiones de GEI, y servir de base para la formulación de políticas públicas destinadas a mitigar los impactos ambientales resultantes de la dinámica demográfica.

En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo analizar los impactos de la estructura etaria en las emisiones de CO₂ procedentes del consumo de energía en el Brasil. El CO₂ es uno de los principales gases de efecto invernadero, tanto a nivel internacional como nacional (SEEG, 2025). La estructura etaria se representa mediante la proporción de la PET (PET), una variable seleccionada por su capacidad para captar la dinámica entre la PET y la población en otros grupos de edad (niños y personas mayores) con mayor probabilidad de estar en situación de dependencia (Golley y Wei, 2015; Zhang et al., 2015). Además, la literatura reconoce a la PET como una fuerza motriz del crecimiento económico (Zhang et al., 2018). Teniendo en cuenta el acelerado proceso de envejecimiento de la población brasileña, cobra relevancia el estudio de la PET en el contexto actual (Peng, 2011). En resumen, el análisis abarca un panel de datos socioeconómicos, demográficos y ambientales de las 27 unidades federativas brasileñas en el período que va de 2002 a 2016.

Una gran parte de los estudios que analizan la relación entre demografía, energía y emisiones se basan en datos transversales de un solo año (Liddle, 2014), pero el uso de datos de panel ofrece ventajas importantes. Por ejemplo, permite controlar variables omitidas (como choques económicos y políticos), considerar características regionales específicas, aumentar el grado de libertad e incorporar la dinámica temporal de la variable dependiente.

Este estudio utiliza un modelo de regresión en dos etapas, mediante el método de momentos generalizados, para analizar los efectos de la proporción de la PET sobre las emisiones de CO₂. En la primera etapa, se estima el impacto de la PET sobre el producto interno bruto (PIB); en la segunda, se evalúan los efectos directos e indirectos de la PET sobre las emisiones, considerados por separado y en conjunto, controlando la endogeneidad e incorporando la dinámica temporal. Un análisis desagregado de las emisiones de CO₂ en el Brasil es importante debido a la heterogeneidad demográfica, socioeconómica y ambiental entre las unidades federativas, lo que puede influir en los patrones de emisión. Además, permite identificar relaciones no lineales entre emisiones y crecimiento económico. En este sentido, esta investigación busca contribuir a cerrar esa brecha y profundizar la comprensión de los determinantes regionales de las emisiones de GEI.

A. Impactos de la estructura etaria en las emisiones de CO₂

La relación entre la estructura etaria de la población y las emisiones de CO₂ asociadas al consumo de energía es compleja y tiene efectos directos e indirectos (Zhang et al., 2018). Los efectos directos resultan de las diferencias en los patrones de consumo de energía entre los distintos grupos etarios (Dimnwobi et al., 2021; Tarazkar et al., 2021), mientras que los efectos indirectos operan a través de variables mediadoras, como el nivel y la estructura de la actividad productiva. Comprender esta relación requiere un enfoque integrado, capaz de captar tanto los impactos directos como las mediaciones económicas ejercidas por la estructura demográfica sobre las emisiones de CO₂ (Zhang et al., 2018). Las subsecciones siguientes analizan estas relaciones.

1. El efecto directo de la estructura etaria en las emisiones de CO₂

El efecto directo se refiere al impacto inmediato de los cambios en la estructura etaria sobre las emisiones, motivado por alteraciones en los patrones de consumo de la población (Zhang et al., 2018). Factores como la edad (o ciclo de vida), el período y las cohortes se han relacionado con cambios en los patrones de consumo de energía y, consecuentemente, con las emisiones. Han et al. (2022) argumentan que la edad es un determinante endógeno de las características biológicas, psicológicas, económicas y sociales que influyen en el consumo individual de energía.

El efecto de período se refiere a eventos exógenos, como crisis económicas o sequías, que afectan la capacidad de consumo de la población. Por su parte, el efecto de cohorte está relacionado con las experiencias históricas y sociales compartidas por individuos nacidos en el mismo intervalo de tiempo, lo que influye en sus hábitos y patrones de consumo (Bell y Jones, 2018; Diógenes, 2022). Aunque dichos efectos son relevantes, el estudio opta por centrarse únicamente en los efectos de la edad, reconociendo, no obstante, que los efectos de período y cohorte están implícitamente presentes en la dinámica de las series temporales analizadas.

La teoría del ciclo de vida de Modigliani (1986) ofrece un marco teórico para comprender cómo la edad influye en el comportamiento del consumo a lo largo de la vida. Relaciona variables macroeconómicas como la renta, los precios y el consumo, mostrando que las personas acumulan riqueza y patrimonio para financiar su consumo en diferentes etapas de la vida. Factores como el tamaño de la familia, la herencia y las oportunidades de inversión afectan esta acumulación. La renta y la riqueza crecen con la edad, alcanzan el punto más alto y luego se utilizan durante la jubilación para mantener el consumo. Así, la estructura etaria de la población impacta directamente en su perfil de consumo, que cambia con el envejecimiento (Diógenes y Ojima, 2020).

La estructura etaria de una población puede influir directamente en las emisiones de GEI debido a los patrones de consumo diferentes de los distintos grupos etarios. Para investigar esta correlación, los estudios frecuentemente utilizan tasas de dependencia como métricas de la dinámica demográfica. Estas tasas establecen una relación entre la proporción de jóvenes (menores de 15 años) y personas mayores (65 años o más) y la PET (de 15 a 64 años) en diferentes contextos geográficos.

Por ejemplo, Tarazkar et al. (2021), en un estudio con datos del Oriente Medio, y Dimnwobi et al. (2021), con datos de África, indican que la estructura etaria posee una asociación significativa con la contaminación ambiental. Esta relación se deriva del hecho de que la PET, al participar más en actividades productivas, consume más energía y recursos que los grupos etarios más jóvenes o de personas mayores, lo que resulta en mayores emisiones. Consecuentemente, países con una elevada proporción de personas en este grupo etario tienden a enfrentar problemas más graves de degradación ambiental, dada su mayor productividad y el impacto de carbono asociado.

En contrapartida, los hallazgos de Yu et al. (2018) en China indican que el envejecimiento de la población puede estar positivamente correlacionado con las emisiones de CO₂. Esta investigación sugiere que, en contextos con un rápido crecimiento de la población de personas mayores y sistemas de apoyo social en desarrollo, como el de China, el consumo de recursos por parte de las personas mayores puede aumentar las emisiones de carbono. Corroborando esta visión, Bano et al. (2022) y Menz y Welsch (2012) indican que las personas mayores consumen más bienes y servicios intensivos en energía, aumentando sus emisiones de CO₂. Al pasar más tiempo en casa, ajustan con frecuencia la temperatura debido a una mayor sensibilidad térmica. Además, muestran mayor resistencia a adoptar tecnologías energéticas eficientes y renovables, reduciendo su propensión a usarlas en comparación con los jóvenes.

De igual modo, Liddle y Lung (2010), al analizar la estructura etaria en países desarrollados, identificaron un patrón en forma de “U” en la intensidad energética a lo largo del ciclo de vida. Según los autores, las personas tienden a adoptar un estilo de vida relativamente intensivo en energía tanto al comienzo de la vida adulta (de 20 a 34 años) como en la fase posterior a la jubilación, después de los 65 años. Sin embargo, entre los 35 y los 64 años, el consumo de energía tiende a ser relativamente menor. Esta variación está relacionada con los cambios en los niveles de actividad económica y los patrones de consumo típicos de cada grupo etario. En general, la estructura etaria influye en el consumo de energía por dos razones principales: i) las personas en diferentes etapas de la vida presentan distintos niveles de actividad económica, lo que afecta directamente al consumo de energía, y ii) la edad del jefe o la jefa de familia tiende a estar asociada con el tamaño del hogar, y los adultos más jóvenes y las personas mayores frecuentemente forman familias más pequeñas, que consumen más energía per cápita que los hogares más numerosos, aunque estos últimos presenten un consumo total mayor.

Por tanto, el análisis del efecto directo de la PET es fundamental para comprender el impacto de la estructura etaria en las emisiones de GEI.

2. El efecto indirecto de la estructura etaria sobre las emisiones de CO₂

Además del efecto directo, la estructura etaria también impacta en las emisiones de forma indirecta, principalmente a través de la producción de bienes y servicios. La literatura sugiere que la relación entre producción y emisiones puede ser no lineal (Zhang et al., 2018). Los cambios en la composición etaria influyen en los indicadores de producción, que, a su vez, afectan al consumo de energía y a las emisiones de contaminantes. Esta relación se detallará en la siguiente subsección.

a) El impacto de la estructura etaria en el crecimiento económico

Los cambios en la estructura etaria influyen en la dinámica del consumo y, en consecuencia, en la producción de bienes y servicios. Según Bongaarts (2009), una mayor proporción de grupos dependientes, niños y adolescentes y personas mayores, tiende a desacelerar el crecimiento económico, mientras que un aumento de la PET puede impulsarlo, debido a la mayor oferta de mano de obra disponible.

Otros estudios internacionales también evidencian esta relación. En Asia Oriental, la transición demográfica favoreció el crecimiento económico, al aumentar la proporción entre la PET con respecto a los dependientes (Bloom y Williamson, 1998; Bloom y Canning, 1999). Estudios posteriores, como los de Wei y Hao (2010) y Zhang et al. (2015), confirman que el aumento de la proporción de la PET desempeñó un papel central en el crecimiento de China, país con la mayor representación en términos de tamaño de población del mundo hasta 2023.

Desde un punto de vista metodológico, los estudios han explorado la relación entre la estructura demográfica y el crecimiento económico utilizando datos desagregados y la proporción de la PET como indicador de la estructura etaria. Esta proporción se ha asociado positivamente al crecimiento, como indican los estudios mencionados anteriormente.

Zhang et al. (2018) ampliaron este análisis investigando los efectos de la estructura etaria en las emisiones de CO₂ en China. Utilizando la proporción de la PET como indicador, los autores descompusieron el efecto total de la variable en impactos directos e indirectos. Los resultados indicaron que el efecto directo está positivamente asociado a las emisiones, mientras que el efecto indirecto varía en función de la renta, presentando una forma de “U invertida”. En otras palabras, la producción posee una relación positiva con las emisiones, pero el envejecimiento de la población, aunque perjudicial para el crecimiento económico a largo plazo, puede atenuar los impactos ambientales.

De esta forma, la proporción de la PET puede representar un vector importante para el crecimiento económico, mientras que el envejecimiento tiende a reducir este ritmo. Por este motivo, Zhang et al. (2015) y Golley y Wei (2015) refuerzan la importancia de utilizar la proporción de la PET como medida de la estructura demográfica en estudios vinculados a esta línea de investigación (Peng, 2011).

b) El impacto de la producción en el consumo de energía y las emisiones de CO₂

La relación entre producción, consumo de energía y emisiones de CO₂ ha sido ampliamente debatida mediante la curva ambiental de Kuznets. Esta hipótesis sugiere que, en las primeras fases del desarrollo de una nación, las emisiones aumentan; sin embargo, a partir de un determinado nivel de renta per cápita, tienden a disminuir (Grossman y Krueger, 1991).

Inspirada en la hipótesis original de Kuznets (1955), que trataba de la relación entre la producción per cápita y la desigualdad de la renta, Grossman y Krueger (1991) adaptaron la curva ambiental de Kuznets para investigar la relación entre la renta per cápita y la contaminación. Los autores observaron que las emisiones de contaminantes tienden a seguir un patrón de “U invertida”, en el que los niveles de contaminación aumentan en las primeras etapas del desarrollo de un país, pero comienzan a disminuir a partir de un determinado umbral de renta.

A pesar de la amplia aplicación de la hipótesis de la curva ambiental de Kuznets, los resultados empíricos continúan siendo contradictorios y sensibles a la metodología utilizada (Dinda, 2004; Stern, 2004). Por este motivo, varios estudios recomiendan no atribuir la responsabilidad de las emisiones exclusivamente a la producción per cápita. Autores como Stefanski (2010) y Zhang et al. (2018) resaltan la necesidad de incluir factores como la estructura económica, los patrones de consumo, los cambios tecnológicos y la estructura demográfica.

En el caso del Brasil, no se encontraron análisis empíricos que exploraran específicamente la relación entre la proporción de la PET y las emisiones de CO₂ asociadas al consumo de energía. Las investigaciones existentes consultadas se concentran en aspectos aislados de la estructura demográfica, y se limitan a examinar su relación con el crecimiento económico o con indicadores de calidad ambiental (Souza et al., 2018). Por su parte, la hipótesis de la curva ambiental de Kuznets solo se ha estudiado a nivel agregado nacional o en recortes espaciales específicos (Alam et al., 2016; Morais, 2019). Como señalan Zhang et al. (2018), los estudios que investigan los efectos directos e indirectos de la proporción de la PET sobre las emisiones de contaminantes aún son escasos.

Por tanto, este estudio se considera relevante, dado que adopta una estructura empírica que considera simultáneamente los efectos directos e indirectos de la PET sobre las emisiones de CO₂. El análisis destaca también porque utiliza datos desagregados de las unidades federativas durante un período de tiempo significativo, lo que permite controlar los efectos de los matices regionales y temporales en la modelación. En la siguiente sección se detallan los aspectos metodológicos de la investigación.

B. Metodología

1. Método empírico

Este estudio pretende estimar no solo el efecto directo de la estructura etaria en las emisiones de CO₂, sino también los efectos indirectos, mediados por el crecimiento económico, y el efecto total resultante de estas interacciones. La elección del modelo econométrico se fundamenta en estudios previos que han explorado mecanismos similares (Cole, 2007; Halkos y Paizanos, 2013; Zhang et al., 2018). La modelación empírica utiliza una función de producción ampliada basada en el modelo de Solow (1956), comúnmente empleado en los análisis del crecimiento económico (véase la ecuación 1):

$$\ln PIBpc_{i,t} = \alpha + \beta_0 \ln PIBpc_{i,t-1} + \beta_1 \ln PET_{i,t} + \beta_2 \ln CAPpc + \beta_3 \ln HUM_{i,t} + \beta_4 \ln ABER_{i,t} + \eta_i + \mu_{i,t} \quad (1)$$

Donde: α es el intercepto; $\ln PIBpc_{i,t-1}$ corresponde al logaritmo de la renta per cápita desfasada; $\ln PET_{i,t}$ es el logaritmo de la proporción de PET; $\ln CAPpc$ representa el logaritmo del capital per cápita (consumo de energía eléctrica per cápita); $\ln HUM_{i,t}$ es el logaritmo del capital humano (media de los años de escolaridad); $\ln ABER_{i,t}$ es el logaritmo del grado de apertura comercial, medido por la razón entre importaciones y exportaciones por el PIB; η_i corresponde a los efectos específicos no observables de cada unidad federativa, cultura, instituciones y otras características regionales; i representa las unidades federativas ($i = 1, 2, \dots, 27$), y t representa la escala temporal ($t = 2002, 2003, \dots, 2016$). Las variables de capital se introdujeron para controlar el efecto de la renta.

En el modelo de la producción se espera que exista un impacto positivo de la proporción de la PET sobre el indicador económico. Esto sucede porque las personas en edad de trabajar contribuyen más al crecimiento en comparación con la población dependiente. Además, la literatura indica impactos positivos de las variables de capital, físico y humano, así como de la apertura comercial, dado que una economía más dinámica y abierta estimula el crecimiento.

A su vez, el modelo empírico de emisiones de CO₂ puede representarse de la siguiente forma (véase la ecuación 2):

$$\ln CO_2pc_{i,t} = \alpha + \beta_5 \ln CO_2pc_{i,t-1} + \beta_6 \ln PET_{i,t} + \beta_7 E \ln PIBpc_{i,t} + \beta_8 E \ln PIBpc_{i,t}^2 + \beta_9 \ln DESM_{i,t} + \beta_{10} \ln ENERpc_{i,t} + \lambda_i + \epsilon_{i,t} \quad (2)$$

Donde: α es el intercepto común; $\ln CO_2pc_{i,t}$ es el logaritmo de las emisiones totales de CO₂ per cápita; $\ln CO_2pc_{i,t-1}$ equivale al logaritmo de las emisiones totales de CO₂ per cápita desfasadas; $\ln PET_{i,t}$ es el logaritmo de la proporción de PET; $E \ln PIBpc_{i,t}$ es el valor ajustado del PIB per cápita; $E \ln PIBpc_{i,t}^2$ es el cuadrado del PIB ajustado; $\ln DESM_{i,t}$ es el logaritmo de

la variable indirecta (*proxy*) para la deforestación; $\ln ENERpc_{i,t}$ es el logaritmo del consumo de energía eléctrica, y λ_i corresponde a los efectos específicos no observables de cada unidad federativa. Las variables de deforestación y consumo de energía se introdujeron con fines de control (Wooldridge, 2015).

En el modelo de emisiones de CO_2 se presupone una relación cuadrática entre las emisiones y el PIB per cápita, tal como sugiere la curva ambiental de Kuznets. Con relación a la deforestación, se espera un efecto positivo sobre las emisiones de contaminantes, dado que el proceso de deforestación y el cambio de uso del suelo constituyen dos de los principales impulsores de las emisiones en el país. Además, se supone una relación positiva entre el consumo de energía y las emisiones de CO_2 , ya que se considera que la producción y el uso de energía son importantes vectores de las emisiones antrópicas.

El coeficiente β_6 estimado en la ecuación 2 representa el efecto directo de la proporción de la PET sobre las emisiones de CO_2 . En cuanto al efecto indirecto, se utilizará el PIB per cápita como variable intermedia (o mediadora), tal como se planteó en trabajos anteriores (Cole, 2007; Halkos y Paizanos, 2013; Zhang et al., 2018).

Las estimaciones de las ecuaciones 1 y 2 fueron realizadas mediante el método generalizado de momentos en diferencias. Este método, propuesto por Arellano y Bond (1991), es robusto en este contexto porque controla la endogeneidad de los modelos mediante el uso de variables instrumentales. En esencia, este método permite estimar los coeficientes de forma consistente en presencia de regresores potencialmente endógenos, como la variable dependiente desfasada, entre otras variables.

La validez del estimador puede comprobarse mediante las pruebas de autocorrelación de primer y segundo orden de Arellano y Bond, así como la prueba de Hansen/Sargan (Hansen, 1982), que examina la ortogonalidad de los errores. En la primera, se espera autocorrelación de primer orden y ausencia de autocorrelación en el segundo componente. En la segunda, no debe rechazarse la hipótesis nula de validación de los instrumentos (valor p no significativo).

Una vez estimadas las ecuaciones 1 y 2, se obtienen los efectos directos, indirectos y totales, según Cole (2007), Halkos y Paizanos (2013) y Zhang et al. (2018). El efecto directo a largo plazo de la proporción de la PET sobre las emisiones se obtiene a partir del coeficiente estimado β_6 en la ecuación 2. A su vez, el efecto indirecto se calcula como el producto del impacto parcial del PIB per cápita sobre las emisiones de CO_2 per cápita (estimado en la ecuación 2) y el impacto parcial de la proporción de la PET sobre el PIB per cápita (estimado en la ecuación 1), como se plantea en la ecuación 3:

$$\text{Efecto indirecto: } \frac{\partial \ln CO_2 pc}{\partial \ln PIB pc} * \frac{\partial \ln PIB pc}{\partial \ln PET} \quad (3)$$

Por último, el efecto total corresponde a la suma del efecto directo y el efecto indirecto, expresándose de la siguiente forma (véase la ecuación 4):

$$\text{Efecto total: } \beta_6 + \frac{\partial \ln CO_2 pc}{\partial \ln PIBpc} * \frac{\partial \ln PIBpc}{\partial \ln PET} \quad (4)$$

2. Base de datos

Con relación a los datos, este estudio utilizó un panel compuesto por las 27 unidades federativas brasileñas durante el período que va de 2002 a 2016. La selección de este intervalo temporal estuvo motivada, en particular, por la disponibilidad conjunta de información para las variables consideradas. Además, este período es interesante en especial porque abarca varios eventos relevantes en la economía brasileña, como la “crisis energética de los apagones” (2001/2002), la crisis financiera internacional (2008), la revocatoria del mandato presidencial (2016), y la inestabilidad económica y política asociada al desequilibrio fiscal ocurrido entre 2013 y 2016.

En el indicador ambiental, se incluyeron las emisiones de CO₂ per cápita, que se consideran una de las principales fuentes de emisiones de GEI a nivel nacional e internacional (Zhang et al., 2018). En lo que respecta a la variable demográfica, se adoptó la proporción de la PET, definida como el cociente entre las personas de 15 a 64 años y la población total.

Para representar la producción, se utilizó el PIB per cápita, a precios constantes de 2010 (Zhang et al., 2018). En cuanto a los factores de producción, se consideró el promedio de años de estudio de las personas con 25 años o más (Cangussu et al., 2010) para representar el capital humano, así como el consumo de energía eléctrica per cápita, variable utilizada como medida del capital físico (Veloso, 2015).

Otro factor relevante es el comercio exterior de las unidades federativas. De acuerdo con Bloom et al. (2010), la intensidad de las transacciones de bienes y servicios con el exterior puede impactar en la producción y las emisiones de contaminantes. Como representación de este factor en la modelación, se incluyó el grado de apertura comercial de las unidades federativas, medido por la suma de las importaciones y exportaciones, dividida por el PIB (Bloom et al., 2010).

Por último, se incorporó el número de focos de incendio por km², con el objetivo de captar la influencia de la deforestación en las emisiones. Según Arraes et al. (2012), la deforestación en el Brasil, impulsada principalmente por la conversión del uso de la tierra para actividades agropecuarias, representa una de las principales fuentes de emisiones de GEI. Por tal motivo, resulta importante considerar este factor en la estructura empírica.

La información sobre las variables, sus unidades de medida y las fuentes de datos figura en el cuadro 1.

Cuadro 1
Descripción de las variables utilizadas en el estudio, 2002 a 2016

Variable	Descripción	Unidad	Fuente
APER	Apertura comercial (precios de 2010)	Reales brasileños (miles)/PIB	Comex Stat/MDIC
PET	Proporción de la población en edad de trabajar	Porcentaje	DATASUS/MS
DES	Focos de incendio (variable indirecta de la deforestación)	Cant./km ²	INPE
CO ₂	Emisiones de dióxido de carbono per cápita	Cant.(kg)/hab	SEEG
PIBpc	PIB per cápita (precios de 2010)	Reales brasileños (miles)/hab	IBGE
ENERpc	Consumo de energía eléctrica per cápita	MWh/hab	EPE
HUM	Promedio de años de escolaridad de las personas con 25 años o más (variable indirecta del capital humano)	año	PNAD/IBGE

Fuente: DATASUS (Ministério da Saúde). (2025). *TabNet Win32 3.3: População residente—Estudo de estimativas populacionais por município, idade e sexo 2000-2021—Brasil*. <http://tabnet.datasus.gov.br>; Ministerio de Fomento, Industria, Comercio y Servicios (2025). *Comex Stat—Dados gerais*. <https://comexstat.mdic.gov.br>; Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales del Brasil. (2025). *Monitoramento dos focos ativos por estado, região ou bioma—Programa Queimadas*. <https://terrabrasil.dpi.inpe.br>; Empresa de Pesquisa Energética. (2025). *Dados abertos: Dados do Anuário Estatístico de Energia Elétrica*. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/dados-abertos/dados-do-anuario-estatistico-de-energia-eletrica>; Instituto Brasileiro de Geografía y Estadística. (2025). *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios—PNAD*. <https://sidra.ibge.gov.br/home/pnad> y *Produto Interno Bruto dos Municípios*. <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais>.

Todas las variables se transformaron en logaritmos, de modo que los coeficientes del modelo pueden interpretarse como elasticidades.

C. Resultados y discusión

1. Estadísticas descriptivas de las variables del estudio

Esta subsección presenta las estadísticas descriptivas de las variables (véase el cuadro 2).

Cuadro 2
Estadísticas descriptivas de las variables en el período, 2002-2016

Variables	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Emisiones de CO ₂ per cápita (Kilogramos per cápita)	23 448	40 878	2 004	389 461
Proporción de la PET (Porcentajes)	65	3	57	72
PIB per cápita (Reales brasileños)	15 751	9 128	4 594	55 341
Consumo de energía eléctrica per cápita (capital físico) (Megavatio hora per cápita)	1,64	0,65	0,44	3,53
Apertura comercial (Reales brasileños)	0,15	0,12	0,003	0,58
Media de los años de estudio (capital humano) (Años)	6,6	1,18	3,98	10,1
Número de focos de incendio (deforestación) (Número por kilómetro cuadrado)	0,03	0,02	0,003	0,17

Fuente: Elaboración propia sobre la base de los resultados del estudio.

Como se muestra en el cuadro 2, la media de las emisiones de CO₂ per cápita en las unidades federativas brasileñas fue de 23.448 kg durante el período analizado. No obstante, la elevada desviación estándar de 40.878 kg revela una heterogeneidad significativa entre los estados, destacando Alagoas con el valor más bajo (2.004 kg) y Mato Grosso con el más alto (389.461 kg).

En cuanto a la estructura demográfica, la proporción promedio de la PET fue del 65%, con una desviación estándar de solo tres puntos porcentuales, indicando una relativa homogeneidad regional. Los valores extremos se registraron en Acre (57%) y el Distrito Federal (72%).

Económicamente, el PIB per cápita medio fue de 15.751 reales, con una desviación de 9.128 reales. Piauí presentó la renta más baja (4.594 reales) y el Distrito Federal, la más alta (55.341 reales).

Por su parte, el consumo medio de energía eléctrica fue de 1,64 MWh per cápita, con una desviación de 0,65 MWh. Piauí registró el menor consumo (0,44 MWh) y Santa Catarina el mayor (3,53 MWh).

Con relación a la apertura comercial, el valor medio fue de 0,15, con una desviación estándar de 0,12. Acre presentó el mínimo (0,003) y Espírito Santo el máximo (0,58), evidenciando diferentes niveles de integración internacional.

La media de años de escolaridad de la población de 25 años o más fue de 6,6 años, con una desviación de 1,18. Alagoas tuvo el promedio más bajo (3,98 años) y el Distrito Federal, el más alto (10,1 años).

Por último, la variable relativa a los focos de incendio por kilómetro cuadrado presentó una media de 0,03, con una desviación estándar de 0,02. Rondônia fue el estado con mayor densidad de focos (0,17/km²), frente a Amazonas, que registró la menor (0,003/km²).

2. Resultados para el modelo de la producción per cápita

En la primera etapa, se propusieron tres especificaciones. El análisis y la comparación de los resultados de estos modelos permite dilucidar la robustez de las estimaciones (véase el cuadro 3).

La estimación de los modelos I, II y III mostró signos coherentes entre los coeficientes, aunque no todas las variables explicativas fueron estadísticamente significativas. Los modelos explicaron aproximadamente el 98% de la variación de la producción per cápita. Los instrumentos utilizados fueron considerados válidos, con exogeneidad confirmada mediante la prueba J de Sargan, y se cumplieron las condiciones de momento requeridas por el método generalizado de momentos, según lo indicado por las pruebas de autocorrelación de Arellano y Bond (1991).

Cuadro 3
Resultado de las estimaciones correspondientes al PIB per cápita, 2002-2016

Variables	Modelo I	Modelo II	Modelo III
$\ln PIBpc_{t-1}$	0,287***	0,297***	0,796***
$\ln PET$	-0,613**	-0,471 ^{NS}	-1,320***
$\ln CAPpc$	0,223***	0,233***	0,278***
$\ln HUM$	0,745***	0,680***	
$\ln APER$	0,008 ^{NS}		
R^2	0,989	0,986	0,985
Prueba AR (1)	0,001	0,001	0,0004
Prueba AR (2)	0,164	0,189	0,544
J Sargan	23,19 (0,508)	31,73 (0,134)	26,00 (0,353)

Fuente: Elaboración propia.

Nota: *** significativo al 1%, ** significativo al 5%, * significativo al 10%, y NS, no significativo. Los instrumentos utilizados fueron: modelo 1: ($\ln PIBpc$, -2, $\ln PET$, -1, $\ln CAPpc$, -1 y $\ln APER$), modelo 2 y modelo 3: ($\ln PIBpc$, -2, $\ln PET$, -1, $\ln CAPpc$, -1).

Los análisis posteriores se basan en el modelo I, que incluyó todas las variables propuestas. Los resultados de esta especificación indican que la proporción de la PET ejerce un impacto negativo en el PIB per cápita. En un estudio similar sobre las provincias de China, Golley y Wei (2015) detectaron también una relación negativa entre la población productiva y la producción per cápita. Según Bloom y Williamson (1998), aunque un aumento de la proporción de la PET tiende a impulsar el crecimiento económico agregado, este crecimiento demográfico puede, en algunos casos, reducir la renta per cápita de la propia PET, como se observó en algunos países de Asia Occidental entre 1965 y 1990.

Kelley y Schmidt (2005) sostienen que este efecto es previsible en economías en las que el crecimiento de la fuerza de trabajo supera el ritmo de las inversiones, lo que resulta en una caída del capital por trabajador. Además, Bloom et al. (2010) señalan que el efecto de la proporción de la PET sobre la renta también depende de la capacidad de la economía para absorber nuevas incorporaciones al mercado de trabajo, lo que puede no producirse plenamente en contextos de bajo dinamismo económico o de rigidez estructural.

En este sentido, el resultado negativo asociado a la variable PET puede atribuirse a factores relacionados tanto con la calidad como con la absorción de la fuerza de trabajo. Aunque el capital físico presentó un crecimiento pronunciado del 270% entre 2002 y 2016, frente a un aumento de apenas el 23% en la proporción de la PET, este progreso puede no haber sido suficiente para compensar la expansión de una fuerza de trabajo con una cualificación media baja. A pesar del incremento en los años medios de estudio de la población, que pasó de 5,8 a 7,4 años en el período, la incorporación de un contingente significativo de trabajadores con niveles educacionales aún reducidos puede haber impuesto una presión negativa en la productividad agregada. De este modo, el crecimiento de la proporción de la PET, cuando no va acompañado de mejoras proporcionales en la cualificación y en

la capacidad de absorción del mercado de trabajo, puede contribuir a una reducción del producto per cápita, como también señalan los estudios de Kelley y Schmidt (2005) y Bloom et al. (2010).

En cuanto al capital per cápita, los resultados indican un efecto positivo y estadísticamente significativo sobre la producción per cápita. Este resultado está en consonancia con Golley y Wei (2015), quienes destacan que un aumento de las inversiones en equipamientos e infraestructuras contribuye a elevar la productividad en la economía. De forma similar, los resultados relativos al capital humano revelan que un aumento del número medio de años de estudio tiene un impacto positivo en la producción. Estos factores, de forma conjunta, indican que el crecimiento del capital físico y humano contribuyen al aumento de la productividad.

Con respecto a la apertura comercial, a pesar de mostrar un signo positivo, no se encontraron señales de que el grado de apertura comercial hubiera influido en la producción per cápita durante el período analizado. Shahbaz et al. (2010) y Golley y Wei (2015) obtuvieron resultados similares con relación a la importancia del grado de apertura.

3. Resultados para el modelo de las emisiones de CO₂ per cápita

En este modelo, se pretendió estimar los efectos directos e indirectos de la proporción de la PET sobre las emisiones de CO₂ per cápita. Para identificar el efecto indirecto, se introdujo el valor del PIB per cápita estimado en el modelo 1, con la intención de captar la mediación ejercida por la dinámica económica, según la hipótesis de la curva ambiental de Kuznets. Las estimaciones del modelo para las emisiones de CO₂ y los puntos de inflexión (*turning points*) se muestran en el cuadro 4.

Cuadro 4

Resultado de las estimaciones correspondientes a las emisiones de CO₂ per cápita, 2002-2016

Variables	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
$\ln CO_2 pc_{t-1}$	0,216***	0,236***	0,222***
$\ln PET$	-7,523***	-4,426***	-4,676***
$\ln PIBpc$	5,658***	3,970***	4,068***
$\ln PIBpc^2$	-0,315***	-0,217***	-0,228***
$\ln DES$	0,055***	0,056***	
$\ln ENERpc$	0,557***		
Puntos de inflexión	8.047	9.200	7.623
R ²	0,963	0,962	0,962
Prueba AR (1)	0,100	0,092	0,098
Prueba AR (2)	0,578	0,481	0,598
J Sargan	29,94 (0,120)	26,68 (0,223)	26,94 (0,258)

Fuente: Elaboración propia.

Nota: *** significativo al 1%. Los instrumentos utilizados fueron: modelo 1: ($\ln CO_2 pc$, -2, $\ln PIBpc$, $\ln PET$, $\ln DES$ y $\ln ENERpc$, -1); modelo 2: ($\ln CO_2 pc$, -2, $\ln PIBpc$, $\ln PET$ y $\ln DES$), y modelo 3: ($\ln CO_2 pc$, -2, $\ln PIBpc$ y $\ln PET$).

Al estimar los modelos I, II y III para las emisiones de CO₂, se verificó en todos los casos la consistencia de los coeficientes y la validez del estimador método generalizado de momentos (estadístico J de Sargan no significativo; autocorrelación de primer orden significativa y autocorrelación de segundo orden no significativa). Para el análisis de esta etapa, se adoptó el modelo I como referencia.

Los resultados presentados (véase el cuadro 4) indican que el aumento de la proporción de la PET puede reducir las emisiones de CO₂ per cápita (efecto directo). En términos numéricos, un aumento del 1% en el grupo poblacional activo está asociado con una reducción del 7,5% en las emisiones per cápita, como promedio. Este hallazgo sugiere que los patrones de consumo energético de las personas en edad de trabajar son, como promedio, menos intensivos en emisiones contaminantes en comparación con los grupos dependientes, como los niños y las personas mayores. Como señalan Bano et al. (2022) y Menz y Welsch (2012), los grupos dependientes suelen demandar un mayor consumo de energía para necesidades específicas, como calefacción y refrigeración, lo que puede dar lugar a emisiones per cápita más elevadas.

Otro hallazgo relevante fue el efecto del PIB per cápita. Las estimaciones indican que la relación entre el PIB per cápita y las emisiones de CO₂ per cápita es no lineal, y presenta forma de “U invertida”, lo que corrobora la hipótesis de la curva ambiental de Kuznets. En particular, este hallazgo representa una contribución a la literatura de dicha curva a nivel nacional, ya que no existían datos sobre esta hipótesis en las unidades federativas brasileñas con este método estadístico. A través de los coeficientes de los términos de producción, fue posible estimar que el impacto positivo de la producción sobre las emisiones se da hasta alcanzar un máximo de 8.047 reales brasileños per cápita (precios de 2010). A partir de ese punto, la relación entre la producción per cápita y las emisiones per cápita comienza a disminuir. Actualmente, solo los estados de Maranhão y Piauí se encuentran en un nivel por debajo del punto de inflexión de la curva ambiental de Kuznets.

Con relación al número de incendios por unidad de área, los resultados indican que esta variable ejerció un efecto positivo y estadísticamente significativo sobre las emisiones de CO₂ per cápita. Específicamente, se estima que un incremento del 1% en la cantidad de focos de incendio está asociado con un aumento de aproximadamente un 0,06% en las emisiones per cápita. Este hallazgo es coherente con el estudio de Baccini et al. (2012), que estimaron que entre 2000 y 2010, la deforestación, una de las principales razones de los incendios, representaba de alrededor del 6% al 17% de las emisiones globales de CO₂, especialmente en países como el Brasil. En general, los mayores índices de focos de incendios se registraron en regiones caracterizadas por una elevada cobertura forestal y bajos niveles de renta. En estos territorios, la conversión de áreas forestales en pastos o tierras agrícolas se ha transformado en una de las principales fuentes de emisiones relacionadas con las actividades agropecuarias (SEEG, 2025).

Por último, las estimaciones indican que el consumo de energía per cápita, utilizado como variable indirecta del capital físico regional, tuvo un impacto positivo y estadísticamente significativo en las emisiones de CO₂ per cápita. Específicamente, un

aumento del 1% en el consumo de energía por persona tiende a aumentar las emisiones per cápita en aproximadamente un 0,56%. Estas conclusiones se corresponden con los resultados de Souza et al. (2018), que identificaron una asociación positiva entre el consumo de energía y las emisiones de CO₂ en el Brasil en el período de 1960 a 2015. De manera similar, Sanquetta et al. (2017), al analizar los datos del estado de Paraná entre 2010 y 2014, también confirmaron que el aumento del consumo de energía contribuyó significativamente al crecimiento de las emisiones de CO₂ en la región.

Para analizar los efectos directos, indirectos y totales de la proporción de la PET en las emisiones de CO₂ per cápita, se consideraron los coeficientes a largo plazo obtenidos a partir de las expresiones (3) y (4). El cálculo de las elasticidades a largo plazo puede consultarse en (Zhang et al., 2018). Según los modelos estimados, la elasticidad a largo plazo de las emisiones per cápita en relación con la PET fue de -9,595, lo que indica que un aumento del 1% en la proporción de PET tiende a reducir las emisiones por personas en un 9,595% a largo plazo.

En lo que se refiere al efecto indirecto, mediado por la producción per cápita, existe una relación no lineal entre la PET y las emisiones, expresada como $-0,86^* [7,21 + 2^*(-0,40^* \ln PIBpc)]$. Los resultados indican que este efecto se mantiene negativo hasta el punto de inflexión estimado en 8.047 reales brasileños per cápita. Por encima de este umbral, el impacto de la proporción de la PET en las emisiones se vuelve positivo, lo que sugiere que el crecimiento económico inducido por una mayor proporción de la PET comienza a intensificar las emisiones de CO₂.

Con respecto al efecto total, representado por $0,69^* \ln PIBpc - 15,81$, se verifica que, a medida que aumenta la producción per cápita, el impacto de la PET sobre las emisiones tiende a ser progresivamente menos negativo. En otras palabras, en las regiones con menor renta per cápita, el efecto total de la PET sobre las emisiones tiende a ser más beneficioso que en las localidades más desarrolladas, posiblemente debido a la composición sectorial y al patrón de expansión económica de estas últimas. No obstante, se observa que el efecto directo, de naturaleza negativa, predomina sobre el indirecto, el cual se torna positivo a partir del umbral de renta estimado.

El efecto negativo de la proporción de la PET sobre las emisiones ha sido observado en estudios anteriores. Liddle y Lung (2010), por ejemplo, identificaron una relación en forma de “U” entre la estructura etaria de la población y el consumo de energía en países desarrollados. Este concepto sugiere que el consumo de energía es relativamente intensivo tanto al inicio de la edad adulta como en la edad de jubilación. Sin embargo, en la mediana edad, el consumo energético es intermitentemente menos intensivo. Esta variación refleja los distintos niveles de actividad económica y los patrones de consumo energético resultantes en cada etapa de la vida.

Yu et al. (2018) también verificaron una relación positiva entre la población dependiente y las emisiones de CO₂ en China. Esta perspectiva sugiere que, en contextos de rápido envejecimiento de la población, como China y el Brasil, de acuerdo con Bano et al. (2022), en el grupo BRICS (Brasil, Federación de Rusia, India, China y Sudáfrica) el consumo de recursos por parte de este grupo etario puede, de hecho, intensificar la huella de carbono.

Además, Bano et al. (2022) y Menz y Welsch (2012) constataron que las personas mayores, como ya se dijo, son más propensas a consumir bienes y servicios intensivos en energía, lo que aumenta su contribución relativa a las emisiones de CO₂. Los hábitos de consumo de las personas mayores pueden influir directamente en el consumo de energía, pues suelen pasar más tiempo en casa y poseen mayor sensibilidad térmica. A esto se suma una mayor reticencia a la hora de adoptar nuevas tecnologías energéticas, lo que puede resultar en una menor propensión a la eficiencia energética y al uso de energías limpias en comparación con los jóvenes.

Ante este escenario, cabe mencionar que la dinámica demográfica brasileña ha estado acompañada de una reconfiguración de los hogares. Se observa una reconfiguración de los hogares, caracterizada por la reducción del número de personas por vivienda y el aumento de los hogares unipersonales, especialmente entre personas mayores, debido al incremento de la longevidad y a la individualización social (Diógenes y Ojima, 2020). Esta transformación implica la pérdida de economías de escala en el uso de servicios energéticos, como iluminación, calefacción y preparación de alimentos, lo que puede resultar en una mayor demanda energética y niveles más altos de emisiones.

Considerando que los efectos directos de los cambios demográficos influyen marcadamente en los patrones de consumo de los hogares, y ante el rápido envejecimiento de la población brasileña, se vuelve esencial desarrollar políticas públicas enfocadas en este grupo etario, especialmente para ampliar el acceso a bienes duraderos con mayor eficiencia energética, como electrodomésticos de bajo consumo. Aunque las políticas que incentivan la adquisición de estos equipos son importantes, la concientización de la población es fundamental, ya que el simple avance tecnológico no garantiza la reducción total del consumo de energía o de las emisiones debido al “efecto rebote”⁴, donde las ganancias de eficiencia pueden ser anuladas por el aumento del uso. Esta compleja dinámica, muchas veces subestimada en los debates sobre políticas ambientales, refuerza la relevancia de los análisis que integran aspectos económicos, energéticos y ambientales en el diseño de tales políticas públicas.

D. Consideraciones finales

Los cambios en la composición etaria de la población brasileña impactan en la producción, el consumo de energía y las emisiones de contaminantes. En este sentido, esta investigación analizó los impactos de la estructura etaria en las emisiones de CO₂ asociadas al consumo de energía en el Brasil entre 2002 y 2016. Por medio de dos modelos de método generalizado de momentos que consideraron la PET como variable indirecta de la estructura etaria, se estimaron los efectos directos, indirectos y totales de la variable demográfica sobre las emisiones.

⁴ El efecto rebote de energía se produce cuando una parte o la totalidad del ahorro de energía esperado con la mejora de la eficiencia energética es compensado por un aumento del consumo debido a cambios de comportamiento, como un uso más frecuente de los equipamientos o la adquisición de nuevos productos (Lin y Liu, 2015).

Los resultados revelaron que la PET impacta negativamente en las emisiones de CO₂ per cápita a largo plazo (efecto directo). Además, se observaron efectos indirectos negativos de esta población, condicionados por el nivel de producción per cápita, hasta alcanzar una cifra de 8.047, reales brasileños. Por otro lado, a partir de este umbral, la relación indirecta entre la PET y las emisiones de CO₂ per cápita pasa a ser positiva. Sin embargo, el efecto total estimado muestra la prevalencia del efecto negativo del indicador poblacional a largo plazo.

A partir de las estimaciones obtenidas, se constató que los cambios en la estructura etaria de la población brasileña, especialmente la ampliación del peso relativo de la PET, ejercen una influencia significativa en las emisiones de CO₂ asociadas al consumo de energía. El efecto directo negativo de la proporción de la PET sugiere que una mayor proporción de esta población puede estar relacionada con la adopción de prácticas productivas y patrones de consumo más eficientes, posiblemente impulsados por la incorporación de tecnologías, una mayor urbanización y la transición hacia sectores económicos menos intensivos en carbono.

Además, los efectos indirectos apuntan hacia una relación no lineal entre la estructura etaria y las emisiones, condicionada por el nivel de renta per cápita. Se observa que, hasta un determinado nivel de renta, un aumento de la actividad económica potencia el impacto mitigador de la proporción de la PET sobre las emisiones. Sin embargo, a partir del punto de inflexión, este efecto se invierte, indicando que, en etapas más avanzadas de desarrollo, tal proporción puede afectar positivamente a la variable ambiental.

Por consiguiente, es posible concluir que las políticas públicas destinadas a reducir las emisiones de CO₂ deben considerar no solo los aspectos productivos y energéticos de las regiones, sino también los efectos directos e indirectos de la dinámica demográfica. En otras palabras, las transformaciones en la estructura etaria no impactan solo en el mercado de trabajo y la economía, sino que además tienen implicaciones ambientales sustanciales, en especial, en las regiones en desarrollo, que aún se encuentran en una trayectoria de transición demográfica.

Se destacan algunas limitaciones metodológicas: los cambios en los procedimientos de recolección y la discontinuidad de la Encuesta Nacional de Hogares (PNAD) limitaron la disponibilidad de series anuales completas; la falta de datos sistemáticos sobre la formación bruta de capital físico en las unidades federativas llevó al uso del consumo de energía como variable indirecta del capital, práctica común en la literatura. El período analizado fue definido por la mayor consistencia de los datos, sin incluir años recientes como el de la pandemia de enfermedad por coronavirus (COVID-19). Futuras investigaciones podrán profundizar el análisis a partir de microdatos domiciliarios o individuales, y examinar distintos indicadores de la estructura etaria para ampliar la comprensión de sus efectos en las emisiones energéticas.

Bibliografía

- Alam, Md. M., Shahbaz, M., y Paramati, S. R. (2016). Relationships among carbon emissions, economic growth, energy consumption and population growth: testing Environmental Kuznets Curve hypothesis for Brazil, China, India and Indonesia. *Ecological Indicators*, 70.
- Arellano, M. y Bond, S. (1991). Some tests of specification for panel data: Monte Carlo evidence and an application to employment equations. *Review of Economic Studies*, 58(2).
- Arraes, R. A., Mariano, F. Z. y Simonassi, A. G. (2012). Causas do desmatamento no Brasil e seu ordenamento no contexto mundial. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 50.
- Baccini, A. G. S. J., Goetz, S. J., Walker, W. S., Laporte, N. T., Sun, M., Sulla-Menashe, D., y Hackler, J. (2012). Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change*, 2(3).
- Bano, S., Zhao, Y., Ahmad, A., y Yang, D. (2022). Dynamic influence of aging, industrial innovations, and ICT on tourism development and renewable energy consumption in BRICS economies. *Renewable Energy*, 192.
- Bell, A. y Jones, K. (2018). The hierarchical age–period–cohort model: Why does it find the results that it finds? *Quality & Quantity*, 52.
- Bloom, D. E. y Canning, D. (1999). *Economic development and the demographic transition: The role of cumulative causality*. Center for International Development at Harvard University.
- Bloom, D. E., Canning, D., Fink, G., y Finlay, J. E. (2010). Implications of population ageing for economic growth. *Oxford Review of Economic Policy*, 26(4).
- Bloom, D. E. y Williamson, J. G. (1998). Demographic transitions and economic miracles in emerging Asia. *The World Bank Economic Review*, 12(3).
- Bongaarts, J. (2009). Human population growth and the demographic transition. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1532).
- Cangussu, R. C., Lima, J. E., y Andrade, T. A. (2010). Uma análise do capital humano sobre o nível de renda dos estados brasileiros: MRW versus Mincer. *Estudos Econômicos*, 40.
- Cole, M. A. (2007). Corruption, income and the environment: An empirical analysis. *Ecological Economics*, 62(3).
- DATASUS (Ministério da Saúde). (2025). *TabNet Win32 3.3: População residente—Estudo de estimativas populacionais por município, idade e sexo 2000-2021—Brasil*. <http://tabnet.datasus.gov.br>
- Dimnwobi, S. K., Ekesiobi, S. C., y Osabohien, R. (2021). Population dynamics and environmental quality in Africa. *Science of The Total Environment*, 797.
- Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets Curve hypothesis: A survey. *Ecological Economics*, 49(4).
- Diógenes, V. H. D. (2022). *Efeitos de idade, período e coorte no consumo de energia elétrica dos domicílios brasileiros no século XXI: Uma análise sob a perspectiva da relação população-consumo-ambiente* [Tesis doctoral, Universidad Federal de Río Grande del Norte].
- Diógenes, V. y Ojima, R. (2020). Análise do impacto da transição da estrutura etária no consumo de energia elétrica domiciliar do Brasil. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 54.
- Empresa de Pesquisa Energética. (2025). *Dados abertos: Dados do Anuário Estatístico de Energia Elétrica*. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/dados-abertos/dados-do-anuario-estatistico-de-energia-eletrica>
- Golley, J. y Wei, Z. (2015). Population dynamics and economic growth in China. *China Economic Review*, 35.
- Grossman, G. M. y Krueger, A. B. (1991). Environmental impacts of a North American Free Trade Agreement. *Working Paper* (3914). National Bureau of Economic Research.

- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2013). *AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- Halkos, G. E. y Paizanos, E. A. (2013). The effect of government expenditure on the environment: An empirical investigation. *Ecological Economics*, 91.
- Han, X., Li, X., Jin, Y., Zhao, D., Wang, S. y Zhang, B. (2022). Aging, generational shifts, and energy consumption in urban China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(37).
- Hansen, L. P. (1982). Large sample properties of generalized method of moments estimators. *Econometrica*, 50(4).
- Hassan, K. y Salim, R. (2015). Population ageing, income growth and CO₂ emission: Empirical evidence from high income OECD countries. *Journal of Economic Studies*, 42(1).
- Instituto Brasileiro de Geografia y Estadística. (2025a). *Censo Demográfico 2022*. <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-demografico/demografico-2022>
- Instituto Brasileiro de Geografia y Estadística. (2025b). *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios—PNAD*. <https://sidra.ibge.gov.br/home/pnad>
- Instituto Brasileiro de Geografia y Estadística. (2025c). *Produto Interno Bruto dos Municípios*. <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais>
- Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales del Brasil. (2025). *Monitoramento dos focos ativos por estado, região ou bioma—Programa Queimadas*. <https://terrabrazilis.dpi.inpe.br>
- Kelley, A. C. y Schmidt, R. M. (2005). Evolution of recent economic-demographic modeling: A synthesis. *Journal of Population Economics*, 18(2).
- Kuznets, S. (1955). Economic growth and income inequality. *The American Economic Review*, 45(1).
- Lee, J., Das, K., Rao, N. D., y Pachauri, S. (2021). The scale and drivers of carbon footprints in households, cities and regions across India. *Global Environmental Change*, 66.
- Liddle, B. (2014). Impact of population, age structure, and urbanization on carbon emissions/energy consumption: Evidence from macro-level, cross-country analyses. *Population and Environment*, 35(3).
- Liddle, B. y Lung, S. (2010). Age-structure, urbanization, and climate change in developed countries: Revisiting STIRPAT for disaggregated population and consumption-related environmental impacts. *Population and Environment*, 31(5).
- Lin, B. y Liu, H. (2015). A study on the energy rebound effect of China's residential building energy efficiency. *Energy and Buildings*, 86.
- Mao, R. y Xu, J. (2014). Population aging, consumption budget allocation and sectoral growth. *China Economic Review*, 30.
- Ministerio de Fomento, Indústria, Comércio y Serviços (2025). *Comex Stat—Dados gerais*. <https://comexstat.mdic.gov.br>
- Menz, T. y Welsch, H. (2012). Population aging and carbon emissions in OECD countries: Accounting for life-cycle and cohort effects. *Energy Economics*, 34(3).
- Modigliani, F. (1986). Life cycle, individual thrift, and the wealth of nations. *The American Economic Review*, 76(3).
- Morais, A. E. A. de. (2019). *A Curva Ambiental de Kuznets para emissão de CO₂ no Brasil: Uma análise com cointegração em painel* [Tesis doctoral, Universidad Federal de Viçosa].
- O'Neill, B. C., Dalton, M., Fuchs, R., Jiang, L., Pachauri, S., y Zigova, K. (2010). Global demographic trends and future carbon emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(41).
- Peng, X. (2011). China's demographic history and future challenges. *Science*, 333.

- Sanquetta, C. R., Corte, A. P. D., Gonçalves, A. P., Santos, D. A., y Gasparetto, N. (2017). Emissões de dióxido de carbono associadas ao consumo de energia elétrica no Paraná no período 2010–2014. *Biofix Scientific Journal*, 2(1).
- Sistema de Estimación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. (2025). <https://plataforma.seeg.eco.br>
- Shahbaz, M., Lean, H. H., y Shabbir, M. S. (2010). Environmental Kuznets curve (EKC): Time series evidence from Portugal. *Energy Policy*, 38(5).
- Simões, C. C. da S. (2016). *Relações entre as alterações históricas na dinâmica demográfica brasileira e os impactos decorrentes do processo de envelhecimento da população*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- Solow, R. M. (1956). A contribution to the theory of economic growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1).
- Souza, E. S. de, Lima, J. E., Rocha, A. N., y Barros, J. R. M. (2018). Determinantes e emissões de CO₂ no Brasil e investigação da hipótese Environmental Kuznets Curve (EKC). *Amazônia, Organizações e Sustentabilidade*, 6(2).
- Stefanski, R. (2010). *On the mechanics of the Green Solow Model*. Oxford Centre for the Analysis of Resource Rich Economies, University of Oxford.
- Stern, D. I. (2004). The rise and fall of the Environmental Kuznets Curve. *World Development*, 32(8).
- Tarazkar, M. H., Ahmad, N., y Azadi, H. (2021). The impact of age structure on carbon emission in the Middle East: The panel autoregressive distributed lag approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(26).
- Veloso, A. C. P. e F. (2015). *Rio de Janeiro: Um estado em transição*. Editora FGV.
- Wei, Z. y Hao, R. (2010). Demographic structure and economic growth: Evidence from China. *Journal of Comparative Economics*, 38(4).
- Wooldridge, J. M. (2015). *Introductory econometrics: A modern approach*. Cengage Learning.
- Yu, B., Zhang, J., y Wang, Z. (2018). Future scenarios for energy consumption and carbon emissions due to demographic transitions in Chinese households. *Nature Energy*, 3(2).
- Zhang, H., Wang, X., y Liu, Y. (2015). Demographic age structure and economic development: Evidence from Chinese provinces. *Journal of Comparative Economics*, 43(1).
- Zhang, Z., Yang, L., y Wang, J. (2015). Empirical study on the environmental pressure versus economic growth in China during 1991–2012. *Resources, Conservation and Recycling*, 101.
- Zhang, Z., Liu, Y., y Wang, J. (2018). How does demographic structure affect environmental quality? Empirical evidence from China. *Resources, Conservation and Recycling*, 133.