



Documento N° 584

ARCHIVOS DE ECONOMÍA

Impacto de un Esquema de Comercio de Emisiones (ETS) en la Reducción de Emisiones de Dióxido de Carbono en Colombia: Un Enfoque desde la Curva Ambiental de Kuznets

Mauro A. Reyes-Bonilla

maurreyes@dnpp.gov.co

Fabián Darío Villalba

fvillalba@dnpp.gov.co

Carolina Díaz Giraldo

cardiaz@dnpp.gov.co

Noviembre de 2025

Impacto de un Esquema de Comercio de Emisiones (ETS) en la Reducción de Emisiones de Dióxido de Carbono en Colombia: Un Enfoque desde la Curva Ambiental de Kuznets

Impact of an Emissions Trading Scheme (ETS) on Carbon Dioxide Emissions Reduction in Colombia: An Approach based on the Environmental Kuznets Curve

Mauro A. Reyes-Bonilla, Fabián Darío Villalba, Carolina Díaz Giraldo

Dirección de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Departamento Nacional de Planeación¹

Resumen

El cambio climático representa una amenaza crítica en el siglo XXI, impulsada principalmente por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) derivadas de actividades humanas como la quema de combustibles fósiles y la deforestación. Este estudio evalúa el impacto de implementar un sistema de comercio de emisiones (ETS) en Colombia para reducir las emisiones de GEI, en línea con los compromisos del país en el Acuerdo de París y su meta de reducir 51% de sus emisiones para 2030. Basado en la experiencia de países con ETS y la hipótesis de la Curva Ambiental de Kuznets (por sus siglas en inglés - EKC), se analizó la relación entre el crecimiento económico de Colombia y sus emisiones de GEI. La metodología incluyó un análisis econométrico para validar la EKC frente a CO₂; y, alternativamente, a todos los GEI (en términos de CO₂ equivalente), seguido de un análisis de escenarios proyectados con técnicas de aprendizaje automático. Los resultados son compatibles con una EKC en relación con CO₂, pero no para el total de GEI incluyendo las emisiones correspondientes a cambios de uso del suelo. Las proyecciones para 2030 muestran que, sin ETS, las emisiones alcanzarían 2.29 t de CO₂ per cápita, mientras que un ETS reduciría esta cifra a 2.21 t, tomando como referencia la primera fase del ETS europeo, y a 2.03 t per cápita tomando el efecto de países de referencia desacoplados. Los hallazgos sugieren que el ETS podría contribuir a la descarbonización del país al lograr

¹ Las opiniones, análisis, resultados y conclusiones presentados en este artículo son de entera responsabilidad de los autores. Su contenido no refleja necesariamente la posición institucional del Departamento Nacional de Planeación (DNP) ni compromete de manera alguna su posición respecto a políticas públicas, decisiones o lineamientos técnicos.

reducciones en un rango de 3.9 Mt a 13.8 Mt frente al escenario BAU equivalentes a al 2.3% y 8.2% de la NDC a 2030.

Palabras clave: Acuerdo de París, Dióxido de Carbono, Dióxido de Carbono Equivalente, Sistemas de Comercio de Emisiones, Curva Ambiental de Kuznets

Abstract

Climate change poses a critical threat in the 21st century, driven primarily by greenhouse gas (GHG) emissions from human activities such as fossil fuel combustion and deforestation. This study assesses the impact of implementing an emissions trading system (ETS) in Colombia to reduce GHG emissions, in line with the country's commitments under the Paris Agreement and its goal of reducing emissions by 51% by 2030. Based on the experience of countries with ETSs and the Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis, the relationship between Colombia's economic growth and its GHG emissions was analyzed. The methodology included an econometric analysis to validate the EKC against CO₂ and, alternatively, against all GHGs (in terms of CO₂ equivalent), followed by an analysis of projected scenarios using machine learning techniques. The results are consistent with an EKC (Emissions Trading System) for CO₂, but not for total GHG emissions including those from land-use change. Projections for 2030 show that, without an ETS, emissions would reach 2.29 t of CO₂ per capita, while an ETS would reduce this figure to 2.21 t, based on the first phase of the European ETS, and to 2.03 t per capita considering the effect of decoupled reference countries. The findings suggest that an ETS could contribute to the country's decarbonization by achieving reductions ranging from 3.9 Mt to 13.8 Mt compared to the BAU (Business As Usual) scenario, equivalent to 2.3% and 8.2% of the 2030 NDC .

Key words: Paris Agreement, Carbon Dioxide, Equivalent Carbon Dioxide, Carbon Pricing Schemes, Emission Trading Systems, Environmental Kuznets Curve

1. Introducción

El cambio climático es una de las principales amenazas que enfrenta la humanidad en el siglo XXI. Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄), derivadas de actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, la deforestación y la fermentación entérica, están acelerando el calentamiento global, lo que provoca impactos devastadores en los ecosistemas y sociedades. Esta problemática tiene efectos adversos en economías y comunidades, lo que ha llevado a un consenso internacional sobre la urgencia de reducir dichas emisiones (IPCC, 2023).

Entre los instrumentos de mercado concebidos para lograr las reducciones de emisiones necesarias para mitigar el cambio climático, los sistemas de comercio de emisiones (ETS, por sus siglas en inglés) y los impuestos al carbono han demostrado ser mecanismos efectivos, cada uno con ventajas comparativas según el contexto (World Bank, 2023). Mientras algunos estudios sugieren que los impuestos al carbono pueden lograr mayores reducciones de emisiones (Döbbling-Hildebrandt, et al, 2024), otros destacan la eficiencia dinámica y la certidumbre en el nivel de reducción de un ETS (Jung & Song, 2023; ICAP, 2024).

Un ETS establece un límite total de emisiones permitidas y permite que las empresas compren y vendan permisos de emisión dentro de ese límite, incentivando así la reducción de emisiones de manera costo-efectiva. Por ejemplo, en la Unión Europea, las fases 1, 2 y 3 del ETS lograron reducciones de emisiones per cápita de 3.1%, 9.4% y 10.7% respectivamente, disminuyendo las emisiones promedio de 8.894 a 7.330 toneladas per cápita. En China, los mercados regionales de ETS redujeron emisiones de CO₂ en sectores regulados hasta casi 1% anual sin afectar la actividad económica local. Estos sistemas promueven además la innovación tecnológica y la adopción de modelos productivos más limpios, facilitando una transición hacia un crecimiento económico con menor impacto ambiental. Así, las tasas significativas de reducción reflejan la eficacia del ETS como una estrategia que combina regulación estricta con incentivos de mercado para mitigar el cambio climático (Jung & Song, 2023; Li, Y., Zhao, J. 2026).

De acuerdo con la experiencia internacional, los ETS han contribuido a reducir las emisiones de CO₂ tanto en economías desarrolladas como en desarrollo, ayudando a desacelerar su crecimiento y a desvincularlo progresivamente del crecimiento económico. Este proceso, conocido en la literatura como *desacoplamiento*, representa el punto de inflexión en el que las emisiones dejan de aumentar a medida que crece la economía (X. Zhang et al., 2017; Li & Duan, 2021). Jung y Song (2023) presentan amplia evidencia de que los países que ya han iniciado este proceso de desacoplamiento muestran tasas de reducción de carbono más rápidas que aquellos que aún no han implementado un ETS. En contextos donde el desacoplamiento aún no se ha consolidado, la introducción de un ETS tiende al menos a ralentizar el ritmo de crecimiento de las emisiones.

Por otro lado, la hipótesis de la Curva Ambiental de Kuznets (EKC) plantea que algunos indicadores ambientales, como las emisiones per cápita, tienden a aumentar en las primeras etapas del desarrollo económico y luego a disminuir después de alcanzar un cierto umbral de ingreso (Grossman & Krueger, 1991; Panayotou, 1993). Sin embargo, esta es una hipótesis empírica basada en patrones observados, no un resultado automático ni garantizado del crecimiento económico. En este contexto, los ETS pueden facilitar alcanzar el punto de inflexión de la EKC a niveles de ingreso más bajos o acelerar el proceso de desacople entre crecimiento y contaminación, pero no aseguran por sí mismos la reducción de emisiones. Por lo tanto, los ETS constituyen una herramienta que complementa el desarrollo económico sostenible y favorece la mitigación ambiental, sin sustituir la necesidad de políticas integrales y mayor transformación estructural en las economías (Jung & Song, 2023; Grossman & Krueger, 1991).

Los ETS enfrentan desafíos como la necesidad de una infraestructura sólida para la gestión y verificación de permisos, así como un diseño regulatorio robusto que evite la fuga de carbono. Este fenómeno ocurre cuando los mayores costos derivados del ETS incentivan el traslado de industrias a países sin regulación climática, reduciendo la efectividad global del mecanismo (Wang, M; & Kuusi, T. 2024). La experiencia del EU ETS muestra además que la sobreasignación inicial de permisos — cerca del 6 % en su Fase I— limitó su impacto ambiental y afectó la competitividad de algunos sectores (Ellerman & Buchner, 2007). Por ello, un ETS nacional requiere un diseño cuidadoso que equilibre los objetivos de mitigación con la sostenibilidad económica (GGGI, 2024).

En el caso colombiano, el país es parte del Acuerdo de París mediante la ratificación de la Ley 1844 de 2017 y el depósito del instrumento de ratificación ante Naciones Unidas el 12 de julio de 2018. Asimismo, presentó su NDC actualizada en diciembre de 2020, con el compromiso de reducir el 51% de sus emisiones de GEI (169,4 Mt CO₂eq) para 2030 respecto al escenario de referencia y alcanzar la carbono-neutralidad en 2050. Estas metas fueron incorporadas en la Ley 2169 de 2021, la cual establece un plan de implementación y seguimiento.

Colombia cuenta con un Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) que registra datos desde 1990 hasta 2021 (IDEAM et al., 2024). En 2021, las emisiones netas fueron de 280.1MtCO₂eq, frente a 222.6 Mt CO₂eq en 1990, lo que representa un incremento del 25.80%. Dentro de estas, las emisiones netas de CO₂ aumentaron un 9.90% en el mismo periodo, pasando de 169.6Mt CO₂eq a 186.4Mt CO₂eq.

A nivel sectorial, silvicultura, uso y cambio de uso de la tierra (LULUCF, por sus siglas en inglés) fue el mayor contribuyente a las emisiones netas en 2021, con una participación del 34.49%, seguido por el sector energía (32.71%) y agricultura (20.69%). Las emisiones de LULUCF están asociadas principalmente con la deforestación y la degradación del bosque natural. En el sector energía, las emisiones provienen sobre todo del transporte por carretera y la aviación nacional, la producción de electricidad y calor, la fabricación de combustibles sólidos y la refinación de petróleo. En agricultura,

las emisiones se deben principalmente a la gestión del ganado y de los suelos agrícolas. Además, es importante destacar que las absorciones en el sector de LULUCF se han cuadruplicado al pasar de 5.7Mt CO₂eq en 1990 a 22.8Mt CO₂eq en 2021, gracias al crecimiento de tierras forestales, pastizales y sistemas silvopastoriles.

Estos datos subrayan la importancia de mecanismos de mercado, tales como el mecanismo de no causación del impuesto al carbono creado por la Ley 1819 de 2016, que incentiven la reducción de emisiones, especialmente en los sectores de energía y AFOLU (Agriculture, Forestry and Other Land Use, por sus siglas en inglés), el cual agrupa tanto las emisiones del sector agrícola como aquellas derivadas de LULUCF. Ambos sectores son clave para la descarbonización del país.

En Colombia, el mercado de carbono muestra un avance significativo tanto en su componente regulado como en el voluntario. Según la Global Green Growth Institute (GGGI, 2024), cerca del 36 % de los proyectos de mitigación corresponden a iniciativas REDD+, el 17 % a proyectos de reforestación y el 30 % a industrias energéticas. De acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2024), desde la creación del mecanismo de no causación del impuesto al carbono se han compensado más de 102 Mt CO₂e entre 2017 y marzo de 2024. Este instrumento, establecido por la Ley 1819 de 2016, reglamentado mediante el Decreto 926 de 2017 y modificado por la Ley 2277 de 2022, permite eximir parcialmente del pago del impuesto a quienes compensen sus emisiones mediante proyectos certificados; sin embargo, desde 2022 su alcance se limita al 50 % del valor del tributo. En este contexto, Asocarbono (2024) reporta la existencia de 67.6 millones de certificados de carbono disponibles para retiro bajo este mecanismo, lo que refleja la consolidación del mercado voluntario nacional.

Colombia también avanza en la reglamentación del Programa Nacional de Cupos Transables de Emisión (PNCTE), instrumento creado por la Ley 1931 de 2018 como parte del Sistema Nacional de Cambio Climático (SISCLIMA) y que se encuentra actualmente en reglamentación, que sienta bases institucionales para los instrumentos obligatorios de mercado en el país. El PNCTE constituye el marco para la implementación de un ETS que fijará un límite máximo a las emisiones de GEI en sectores priorizados y asignará cupos transables que podrán intercambiarse entre los agentes regulados, en coherencia con la Política Nacional de Cambio Climático y la arquitectura de gobernanza definida para el SISCLIMA. Su diseño se plantea bajo criterios de gradualidad, estabilidad regulatoria y costo-efectividad, y se articula como un medio de implementación directo de la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC), ya que traduce las metas de mitigación en obligaciones cuantificables y verificables a través del sistema nacional de monitoreo, reporte y verificación (MRV) establecido por la Resolución 1447 de 2018 y los compromisos consignados en la Actualización de la NDC de Colombia (2020).

En el ámbito internacional, el país continúa con la transición de los proyectos del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) hacia el mecanismo del Artículo 6.4 del Acuerdo de París, en línea con las

reglas, modalidades y procedimientos adoptados mediante la Decisión 3/CMA.3 y el marco para la transición de actividades MDL establecido por la Decisión 7/CMA.4, desarrollados en la documentación técnica de la UNFCCC sobre el mecanismo del Artículo 6.4 y la transición de actividades MDL. De los 70 proyectos MDL registrados históricamente por Colombia, solo 9 cumplen actualmente los requisitos de transición al Artículo 6.4, según los análisis técnicos disponibles, lo que implica un proceso riguroso de alineación en materia de integridad ambiental, adicionalidad y evitación de doble contabilidad (GGGI, 2024).; este proceso será clave para articular los futuros mercados internacionales de carbono con el desarrollo interno del PNCTE y posicionar a Colombia como un oferente confiable de reducciones verificadas de emisiones.

Dados los compromisos internacionales en materia de reducción de emisiones, y el rol estratégico de los ETS como instrumentos económicos para la mitigación del cambio climático, en este documento se analiza el impacto potencial de un ETS en Colombia, utilizando como referencia las tasas de reducción de emisiones observadas en experiencias internacionales. Considerando que el país avanza en la reglamentación e implementación de su ETS con la puesta en marcha del PNCTE, el análisis propuesto busca generar insumos útiles para este proceso estimando cómo la adopción plena de un ETS nacional podría contribuir a la reducción de GEI en el país, en coherencia con los compromisos establecidos en su Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) y con la meta de carbono neutralidad hacia 2050.

A nivel metodológico, destacamos que este estudio utiliza un enfoque basado en la EKC (Jung & Song, 2023) , donde las tasas de reducción observadas en ETS de otros países son utilizadas como proxy para estimar el impacto potencial de implementar un esquema similar en Colombia. La premisa metodológica es que la experiencia internacional proporciona parámetros empíricos que permiten proyectar escenarios de mitigación en los sectores energético e industrial. No obstante, es importante reconocer que las tasas de reducción logradas en otros países pueden no ser directamente aplicables al contexto colombiano, dada su distinta estructura económica, matriz energética y composición sectorial. Por ello, los escenarios internacionales se emplean únicamente como una referencia aproximada, más que como una predicción exacta de los resultados nacionales.

Los resultados permiten cuantificar la contribución potencial de un ETS —como instrumento clave de política climática— al cumplimiento de las metas establecidas en la NDC colombiana. Cabe precisar que un ETS nacional no necesariamente tendría su límite de emisiones definido exclusivamente por la NDC, pues su diseño dependería de múltiples factores sectoriales y de política económica. Aun así, evaluar su efecto sobre la NDC permite dimensionar su utilidad dentro del portafolio más amplio de políticas climáticas del país.

2. Revisión de literatura

Los estudios empíricos destacan el potencial de los ETS para reducir las emisiones de carbono y facilitar la transición hacia economías más sostenibles. En China, Y. Zhang & Zhang (2019) identificaron un impacto positivo y progresivo de los ETS en el desarrollo de economías con bajas emisiones, mientras que Wang et al. (2019) encontraron que las regiones piloto lograron reducir sus intensidades de CO₂ en un 12 % nominal y un 7,6 % real, principalmente gracias a la disminución en la proporción de carbón en el consumo energético y a la modernización industrial. Fujimori et al. (2016) estimaron que un ETS podría evitar la pérdida de bienestar global en un 75 % para los países de la OCDE, aunque señalaron posibles impactos distributivos en economías en desarrollo. X. Zhang et al. (2017) mostraron que la integración multirregional de los ETS (China, Estados Unidos, Europa, Australia, Japón y Corea) generaría beneficios económicos netos, mientras que Li & Duan (2021) concluyeron que la vinculación entre los sistemas de China, la UE y Japón mejoraría el bienestar agregado, aunque con efectos adversos sobre la competitividad de algunos sectores.

En América Latina, Oliveira et al. (2020) propusieron que la integración regional de mercados de carbono a través de un ETS podría fortalecer la efectividad de las políticas climáticas, con Brasil y México liderando la reducción de emisiones. Diniz Oliveira et al. (2019, 2021) encontraron que un esquema de límites flexibles en Brasil podría ofrecer mitigaciones costo-efectivas y reducir los impactos sobre la competitividad. En otros contextos, Nong et al. (2020) para Vietnam concluyeron que una cobertura amplia del ETS —en lugar de limitarlo a pocos sectores— minimiza los efectos económicos adversos, mientras que Boran & Kayacan (2023) evidenciaron en Turquía que la eficiencia del ETS depende de la transparencia y la competencia del mercado. Jia (2023) mostró que los ETS pueden tener efectos negativos de corto plazo sobre sectores downstream, pero positivos a largo plazo al inducir innovación tecnológica y mejoras de productividad.

En el caso colombiano, la literatura reciente ha comenzado a abordar el diseño e impacto potencial de un mercado doméstico de carbono. El PNCTE, constituye el primer sistema nacional obligatorio de comercio de emisiones (ETS) de Colombia. Su desarrollo técnico ha sido liderado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), que avanza en su reglamentación y articulación con el impuesto nacional al carbono y el Registro Nacional de Reducción de Emisiones (RENARE).

El DNP en 2024 elaboró un estudio sobre la descarbonización y sus costos efectivos, donde realiza una evaluación del impacto de un ETS en Colombia en equilibrio parcial, que representa un análisis ex ante de un ETS para Colombia, a través de un modelo de equilibrio parcial con curvas de costos marginales de abatimiento (MACC) del Banco Mundial. El estudio estima que el costo promedio de reducción sin comercio oscila entre USD 13 y 7140 por tCO₂e, mientras que con un ETS nacional podría reducirse a USD 37.7 por tCO₂e, y a solo USD 0.2 por tCO₂e si se incluyen sectores AFOLU. En términos macroeconómicos, el costo total de cumplimiento pasaría del 5 % del PIB sin comercio

a 0.3 % con ETS y 0.1 % si se incluye AFOLU, demostrando el alto potencial de eficiencia económica de este instrumento. Además, el estudio resalta la necesidad de políticas complementarias en innovación, infraestructura y competitividad para asegurar una transición justa y sostenible (Alvarez-Espinosa; 2024).

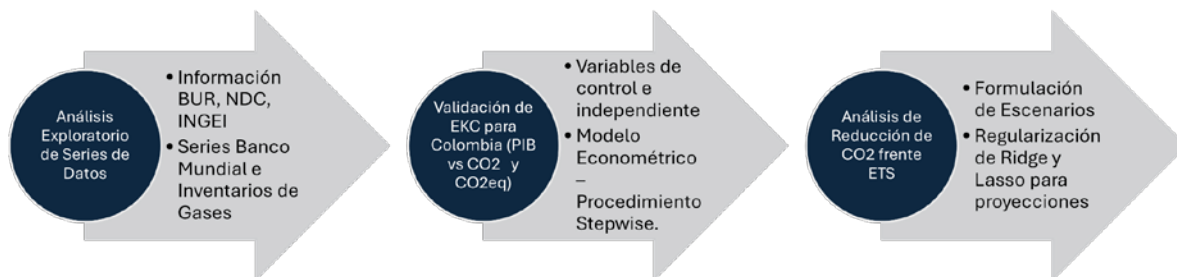
En conjunto, estos hallazgos posicionan los ETS como herramientas clave para alcanzar los compromisos climáticos de Colombia —especialmente las metas de reducción del 51 % de emisiones al 2030 y la neutralidad de carbono al 2050—, pero también evidencian la importancia de un diseño robusto que minimice los efectos distributivos y asegure coherencia con las estrategias de desarrollo económico y territorial.

3. Metodología

Para la estimación del impacto potencial de los ETS en la reducción de emisiones de GEI en Colombia, se analizó la relación entre la dinámica de los GEI y el crecimiento económico colombiano; específicamente, se tomó la experiencia de economías en desarrollo y desarrolladas que han implementado ETS para determinar cuál sería el impacto en la reducción de emisiones per cápita para Colombia con este tipo de instrumentos.

La metodología consta de 3 fases: La primera, un análisis exploratorio de información, la segunda, el análisis de la relación de GEI y crecimiento económico a partir de la validación de la Curva de Kuznets para Colombia frente, por un lado, a CO₂², y, por otro lado, a todos los GEI en términos de CO₂eq, y la tercera, a partir de validar frente a qué tipo de gas Colombia se comporta de forma similar a países que han implementado ETS (en este caso CO₂), se realiza un análisis de escenarios de reducción del CO₂ frente a un ETS (Fig. 1) a partir de la experiencia internacional.

Figura 1: Metodología del estudio



² Emisiones de dióxido de carbono (CO₂) procedentes de la quema de combustibles fósiles y de los procesos industriales. Esto incluye las emisiones del transporte, y la generación de electricidad, pero no el cambio de uso del suelo

Análisis exploratorio de información

Para el análisis exploratorio de la relación entre las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el crecimiento económico en Colombia, se utilizaron datos del Banco Mundial para los indicadores de producto interno bruto (PIB) y población, y del portal Our World in Data (OWID) para las emisiones de CO₂ y CO₂ equivalente (Ritchie et al., 2023).

La información de OWID fue seleccionada por tres razones:

- i) proporciona una serie temporal continua desde 1960, año a partir del cual se dispone de información consistente para las demás variables macroeconómicas;
- ii) incluye las emisiones de CO₂ derivadas de los cambios en el uso del suelo, lo que permite aislar los efectos volátiles de esta actividad y valorar su peso dentro del total de emisiones; y
- iii) facilita la comparación con otros estudios, como el de Jung y Song (2023), quienes estiman la EKC y analizan el impacto de los ETS en distintos países.

En el apéndice (A.1.1) es posible encontrar los cálculos con la información de EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research) (Crippa, et al, 2025); asimismo, en el repositorio del código se encuentra disponible la modelación econométrica con la información de esta base de datos.

Validación de EKC para Colombia frente CO₂ y CO₂eq

Para efectos de comparación con otros países, así como entender los drivers de la generación de GEI en Colombia, se validó la aplicabilidad de la EKC a Colombia. De acuerdo con la literatura existente, la hipótesis de EKC define una forma paramétrica donde E representa el deterioro ambiental, Y es el producto *per cápita*, y Z es un conjunto de variables que inciden en el deterioro ambiental tales como densidad de población (Ecuación 1) (Kaufmann, et al, 1998), grado de apertura comercial, y la estructura productiva (Moonmaw y Unruh, 1997; Panayotou, 1997). Estas variables son consideradas como variables de control y permiten el análisis de su descomposición. El deterioro ambiental es un subproducto de la actividad económica, en consecuencia, se puede descomponer en un efecto escala, que se refiere al crecimiento de la economía; un efecto composición que es un cambio en la estructura de la economía y un efecto tecnología, que aumentan la eficiencia en el uso de la energía y generan menores niveles de contaminantes (Stern, 2003).

Ecuación 1: hipótesis de Curva Ambiental de Kuznets - EKC

$$E = F(Y, Y^2, Z)$$

Para este estudio, la variable ambiental de interés (E) corresponde a:

- i) las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) asociadas principalmente a la quema de combustibles fósiles, y
- ii) el total de gases de efecto invernadero (GEI) expresados en CO₂ equivalente, siguiendo los lineamientos internacionales de reporte.

La hipótesis original de la Curva Ambiental de Kuznets (EKC) plantea una relación en forma de U invertida entre el crecimiento económico y la degradación ambiental; sin embargo, la evidencia empírica muestra que esta relación funcional específica no siempre se aplica, sino que puede presentar patrones alternativos, como relaciones monótonas crecientes o decrecientes (Catalán, 2014), así, en adelante se aborda la EKC que considera relaciones funcionales generales.

Vale la pena indicar que en el caso colombiano los hallazgos frente a la relación PIB y GEI no son concluyentes y todo depende del período de análisis que se tome y los GEI que se incluyan en los estudios. Acevedo y Ramos (2023) por ejemplo, demuestran la existencia de una U invertida en la EKC entre el PIB y las emisiones de CH₄ para el periodo de 1970 - 2018. Blanco y colaboradores (2020) para 1971 – 2014, muestran una relación directa entre el consumo energético, el crecimiento económico y las emisiones de CO₂ en Colombia lo que respalda la aplicabilidad de la hipótesis de la EKC para el caso colombiano, donde, tras una fase inicial de aumento, las emisiones tienden a estabilizarse y luego a disminuir a medida que la economía adopta tecnologías más limpias y eficientes. Sosa y Navarro (2020) llegan a resultados no concluyentes para la hipótesis de EKC al emplear CO₂, PIB per cápita, consumo de energía, urbanización y complejidad económica en el periodo de 1971 - 2014. Asimismo, y para el mismo periodo, Laverde-Rojas y colaboradores (2021) llegan a que la EKC no es válida para Colombia y que no hay evidencia de que las mejoras en la complejidad económica tengan efectos positivos en la reducción de los niveles de contaminación.

Selección de Variables y Estimación del Modelo Final

Con el fin de verificar la aplicabilidad de la EKC al caso colombiano, se estableció el siguiente modelo econométrico, en donde se empleó el procedimiento stepwise en ambas direcciones para explorar las variables explicativas que permitan plantear de forma más robusta tanto el modelo interpretativo como la base para el análisis de escenarios de política (Ecuación 2). El procedimiento stepwise es una forma automatizada de selección de modelos a partir de los criterios de Información de Akaike (AIC) y Bayesiano (BIC), que compara automáticamente una cantidad extensa de modelos y elige el que mejor criterio arroja. El modelo resultante no solo permite identificar los principales drivers de las emisiones en Colombia, sino que también sirve como base para proyectar la línea base de emisiones y evaluar el impacto potencial de un ETS. En la ecuación, las variables están justificadas de forma teórica, lo que reduce el riesgo de posibles relaciones espurias y problemas de identificación, así:

Ecuación 2: Modelo Macro-Econométrico Exploratorio

$$CO_2 = \beta_0 + \beta_1 GDP + \beta_2 \ln(GDP) + \beta_3 \ln(GDP)^2 + \beta_4 TRADE + \beta_5 \ln(TRADE) + \beta_6 POP + \beta_7 \ln(POP) + \beta_8 CPI + \beta_9 \ln(CPI) + \beta_{10} R\&D + \beta_{11} \ln(R\&D) + \beta_{12} RENEW + \beta_{13} \ln(RENEW) + \beta_{14} CONS + \beta_{15} \ln(CONS) + u_{i,t}$$

- **Variables de escala:** PIB per cápita, Población total
- **Variables de composición:** Apertura comercial (TRADE) que corresponde a los niveles de comercio como participación del PIB, Gastos de Consumo (CONS) que corresponde al consumo final de los hogares como participación del PIB
- **Variables tecnológicas:** Gasto en I+D (R&D), Consumo de Energía Renovable (RENEW) ambas como participación del PIB
- **Control macroeconómico:** Índice de Precios al Consumidor (CPI) incorporado para controlar efectos de inflación que pueden influir sobre el nivel real de la actividad económica y el consumo energético.

Donde **CO₂** son las emisiones de carbono per cápita del país y equivalente, y **GDP** es el PIB per cápita.

Análisis de Escenarios de reducción de CO₂ frente a un ETS

Una vez se identificaron las variables más relevantes, se procedió a estimar el modelo final utilizando la técnica Elastic Net para controlar la multicolinealidad y optimizar la capacidad predictiva. Los hiperparámetros se calibraron mediante validación cruzada temporal (TimeSeriesSplit) con 5 particiones, seleccionando un modelo con $\alpha = 0.0001$ y $l1_ratio = 0.1$. La partición de los datos fue de 80% para entrenamiento (1960–2015) y 20% para prueba (2016–2023). Para proyectar la línea base de emisiones hasta 2030, las variables macroeconómicas explicativas se proyectaron así: en PIB se toma la construcción de proyecciones sectoriales realizadas por DADS-DNP, para población se tomaron las proyecciones oficiales del DANE. Para la proyección del resto de las variables macroeconómicas 2024-2030, se utilizaron relaciones históricas recientes: tanto los niveles de comercio como el consumo de los hogares se proyectaron manteniendo su proporción constante respecto al PIB, calculada como el promedio de los últimos 15 años; mientras que el IPC se proyectó aplicando una tasa de crecimiento constante, equivalente a su promedio de inflación de la última década.

Para el análisis se establecieron los siguientes escenarios:

Escenario 1. BAU

Este escenario corresponde a uno tendencial en el cual Colombia no ingresa a un ETS.

Escenario 2. Efecto de las emisiones en acoplamiento.

Este escenario corresponde a uno en el cual Colombia continúa su perfil como país no desacoplado e ingresa a un ETS. Se toma como base la variación promedio (0.111) que obtuvieron los países no desacoplados bajo el ingreso a ETS a partir de Jung & Song (2023). Esta variación surge de tomar el promedio de emisión de CO₂ per cápita tres años antes del ingreso a un ETS y compararlo con el mismo parámetro durante los tres años siguientes al ingreso del ETS, ver Tabla 1

Escenario 3. Efecto de las emisiones en acoplamiento. Fase Inicial - ETS Europeo

Este escenario corresponde a uno en el cual Colombia no se desacopla e ingresa a un ETS. Se toma como base la variación promedio (0.031) que obtuvieron los países en la Primera Fase de (2008) del ETS europeo, ver Tabla 1.

Tabla 1: Efectos del ETS en EU, fases 1,2, y 3

Panel Efectos del ETS en EU (Fases 1 – 2005, Fase 2 – 2008, Fase 3 – 2013)				
Fase	3 años antes	3 años después	Log diferencia	t-value
ETS Fase I	8.894	8.618	0.031	1.980**
ETS Fase II	8.206	7.471	0.094	5.270***
ETS Fase III	8.155	7.330	0.107	4.592***
Países no desacoplados	8.250	7.334	0.111	No especificado

Fuente: a partir de Jung, H., Song, CK. Effects of emission trading scheme (ETS) on change rate of carbon emission. Sci Rep 13, 912 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28154-6>

4. Resultados³

Análisis Gráfico de Emisiones de CO₂ y CO₂eq.

Relación entre PIB per cápita y emisiones de CO₂ per cápita (sin cambio de uso del suelo)

La Figura 2 denota un acoplamiento de las emisiones de CO₂ y el PIB per cápita. Se resalta un cambio en la tendencia en el período de 1980-1999; pero nuevamente en el período de 2000-2022

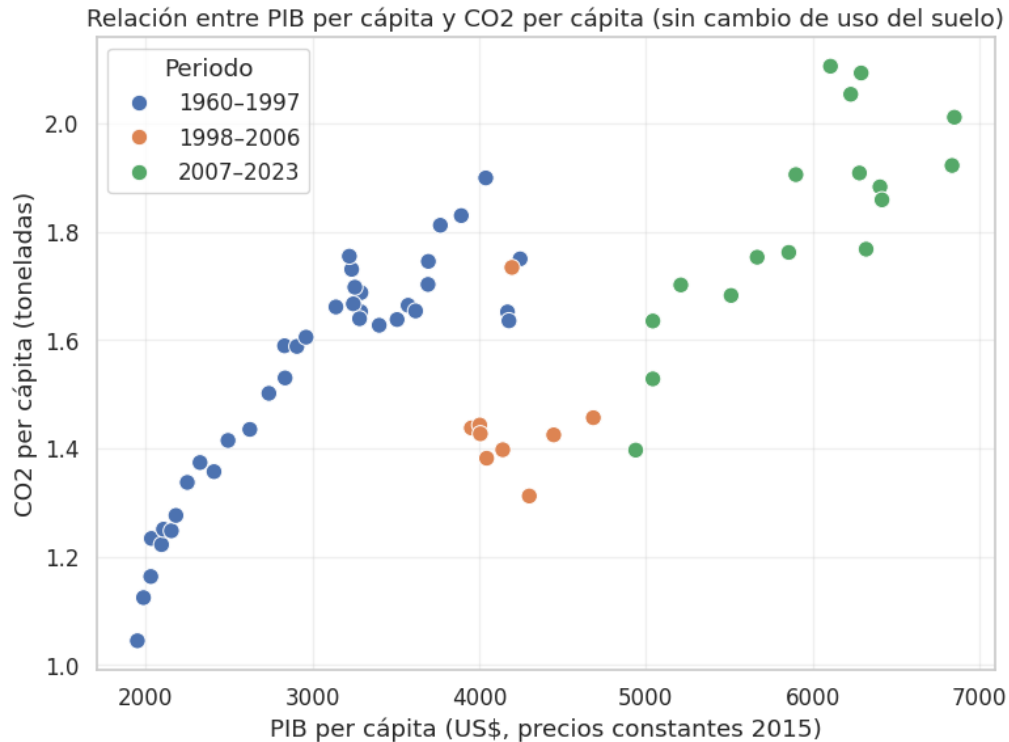
³ Los datos y el código en Python para ejecutar los modelos presentados se encuentran disponibles a solicitud.

continúa el acoplamiento de las emisiones. En general la dinámica de las emisiones de CO₂ refleja los principales hitos del crecimiento económico en Colombia, mientras que para la década 1960 – 1979 el país experimentaba un período de industrialización temprana con políticas de sustitución de importaciones, expansión manufacturera, el sector agropecuario y la urbanización en la década de 1980 – 1999 el país se enfrentó a la crisis de la deuda de los años 80, desaceleración económica y aumento de la deuda externa (GRECO, 2002).

Ya en la década de los años 90 el país inicia un proceso de apertura económica, liberalización del comercio y privatización, en donde hubo un proceso de diversificación de las exportaciones (petróleo, carbón y flores), para luego enfrentar la crisis económica de 2009 (Umaña, 2011). Entretanto el periodo de 2000 – 2022 se ha considerado como uno de bonanza y crecimiento desigual donde las materias primas, especialmente carbón y petróleo han jugado un rol determinante en esta bonanza. De otro lado, vale la pena tener en cuenta el periodo de recuperación post-pandemia y las políticas para la transición energética a partir de 2017.

Es así como la dinámica económica para el período de análisis ha tenido acople evidente con las emisiones de CO₂ consideradas. Principalmente se destacan las crisis financieras que sacudieron a Colombia desde agosto de 1998 hasta finales de 1999, llevando a una contracción del crecimiento económico del -4.2%, la primera recesión en más de seis décadas (Banco de la República, 2000) y la subsiguiente crisis financiera de 2007-2008, lo cual se ha reflejado desde el punto alto en 1.89 t per cápita en 1994 y para llegar a uno de los puntos más bajos en 2007 de 1.39 t per cápita. Asimismo, se resalta la caída en la tendencia a 1.76 t per cápita para el año 2020 de la crisis del COVID y su finalización en el punto más alto a 1.92 t en 2022 para el año de su finalización (Fig. 2). En el último año de la serie en 2023 ya se alcanzan los 2.03 t per cápita.

Figura 2

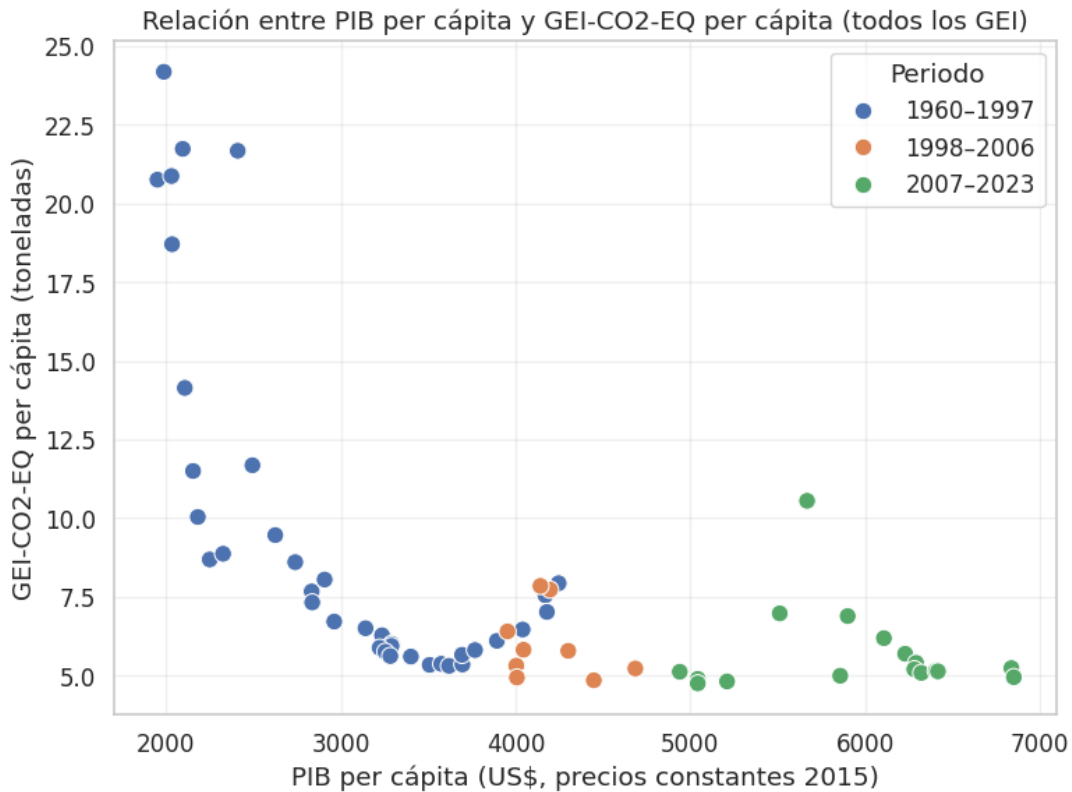


Fuente: Cálculos propios a partir de Banco Mundial para datos de PIB y “Our World in Data” (Ritchie et al., 2023) para datos de CO₂

Relación entre PIB per cápita y todas los GEI en términos de CO₂ equivalente per cápita

A diferencia del caso anterior, aquí la Figura 3 denota un aparente desacople entre las emisiones de CO₂eq y el PIB per cápita sin embargo el efecto parece ambiguo. En el primer período de análisis se denota una disminución de las emisiones per cápita importante al pasar de niveles de 24.1t a 5,3t, ya en el período posterior presenta una relación errática con un promedio de 5.7t con una desviación estándar de 1.15t y un valor máximo de 10.55t. En efecto las emisiones en el primer período de análisis presentan una disminución aparente para el período de industrialización temprana y sustitución de importaciones. Por otro lado, el efecto de las crisis económicas mencionadas anteriormente tiene un efecto similar al del comportamiento de las emisiones de dióxido de Carbono donde en este caso también sugiere un aparente desacoplamiento con la dinámica del PIB. Ya en el último periodo no parece existir una relación entre la dinámica del PIB y los GEI, con coeficiente de correlación de -0.005 (Fig. 3).

Figura 3



Fuente: Cálculos propios a partir de Banco Mundial para datos de PIB y “Our World in Data” (Ritchie et al., 2023) para datos de CO₂

Resultados Econométricos Curva de Kuznets para Colombia

A continuación, se presentan los principales resultados econométricos obtenidos para Colombia, utilizando las variables de control descritas en la metodología. El procedimiento stepwise se aplicó con el propósito de identificar las variables más relevantes y reducir la complejidad del modelo; sin embargo, el modelo final se estimó mediante una regresión lineal ordinaria (OLS), incorporando las variables seleccionadas en sus formas originales, sin transformaciones. Esta aproximación facilita una interpretación más directa de los coeficientes y mantiene la consistencia con la hipótesis de la EKC.

Los resultados muestran un modelo robusto para las emisiones de CO₂ per cápita, pero no para las emisiones totales de GEI expresadas en CO₂ equivalente. Esto se debe principalmente al comportamiento errático de las emisiones asociadas a los cambios de uso del suelo, que introducen alta variabilidad en la serie. A continuación, se presentan los resultados del primer modelo.

Emisiones de CO₂ per cápita

Los resultados permiten confirmar la EKC para Colombia para CO₂. Existe una relación positiva significativa del PIB con respecto a las emisiones de dióxido de carbono. Esta relación es monótona creciente lo que parece indicar que el país todavía se encuentra en la fase inicial de la EKC frente a este gas. De otro lado solo se encontró una ligera relación significativa con los gastos de consumo que puede estar autocorrelacionada con PIB, y una relación significativa con una sola variable de control - el índice de precios al consumidor, con una correlación negativa. Esta relación puede interpretarse con el hecho de que la variación de los productos energéticos (tales como petróleo, gas y carbón), como un componente importante de la inflación desincentiva el consumo lo que a su vez se ve reflejado en la relación inversa del PIB y Dióxido de Carbono (Tabla 2).

Tabla 2: Resultados de estimación que examinan la relación entre PIB y CO₂

Variable	Coefficiente	Error estándar	t	p-valor	[0.025	0.975]
Constante	1.6063	0.011	152.858	0.000	1.585	1.628
PIB	0.7708	0.053	14.658	0.000	0.665	0.877
TRADE	-0.0279	0.023	-1.209	0.233	-0.074	0.019
POB	-0.0893	0.061	-1.457	0.152	-0.213	0.034
IPC	-0.4789	0.049	-9.681	0.000	-0.579	-0.379
CONSUMO	0.0539	0.020	2.698	0.010	0.014	0.094

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Banco Mundial y "Our World in Data" (Ritchie, et al., 2023). El CO₂ son las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) procedentes de la quema de combustibles fósiles y de los procesos industriales. Esto incluye las emisiones del transporte, la generación de electricidad y la calefacción, pero no el cambio de uso del suelo no incluye emisiones del cambio de uso de suelo.

De manera complementaria, la técnica Elastic Net confirmó la robustez de los resultados, obteniendo un R² = 0.93 en el conjunto de prueba y destacando al PIB, IPC y CONSUMO como las variables más influyentes en la predicción de las emisiones. En el repositorio del código es posible encontrar más detalles sobre las pruebas de significancia de los modelos.

En conjunto, estos resultados sugieren que Colombia mantiene una trayectoria ambiental ascendente, donde el crecimiento económico sigue asociado a mayores emisiones de CO₂, sin evidencia del punto de inflexión propuesto por la EKC.

Proyecciones de Reducción de Emisiones de CO₂ por efecto de ingresar a un ETS para Colombia

La Figura 4 presenta las proyecciones de emisiones de CO₂ per cápita para Colombia en el período 2024–2030, derivadas de la técnica Elastic Net, que mostró la mejor capacidad predictiva. En el escenario base (BAU), las emisiones aumentan de 2.01 t de CO₂ per cápita en 2023 a 2.21 t en

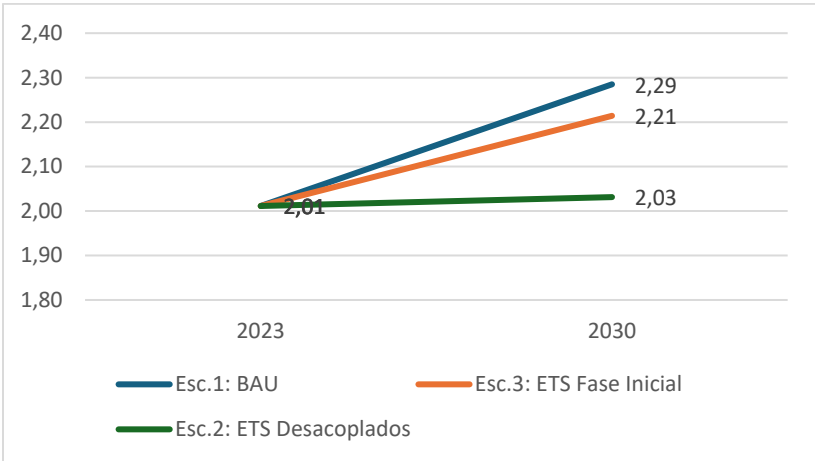
2030, lo que representa un incremento del 13.6 % en el periodo de análisis. Este resultado refleja la tendencia de crecimiento asociada al aumento del PIB, principalmente.

Bajo un Escenario 2 (ETS desacoplados), que asume la implementación completa de un sistema de comercio de emisiones en los sectores energético e industrial, las emisiones se reducirían a 2.03 t de CO₂ per cápita para 2030. En tanto, un Escenario 3 (ETS Europeo parcial), que considera una aplicación gradual o limitada del sistema, proyecta 2.21 t de CO₂ per cápita al final del periodo. Estas reducciones equivalen a ahorros de aproximadamente 13.8 MtCO₂ y 3.9 MtCO₂, respectivamente, en comparación con el escenario BAU.

Estas simulaciones indican que un ETS podría contribuir de manera significativa a contener el crecimiento de las emisiones per cápita y apoyar el cumplimiento parcial de la NDC. No obstante, los resultados deben interpretarse como una proyección parcial, ya que el modelo considera principalmente los sectores energético e industrial, sin incluir las emisiones del sector AFOLU, que representan más del 50 % del total nacional. Así, las reducciones estimadas equivalen aproximadamente al 2.3% y 8.2 % del esfuerzo total de mitigación comprometido por Colombia a 2030 (169,4 MtCO₂eq).

Finalmente, debe tenerse en cuenta que Colombia también ha implementado otras políticas de mitigación, como el impuesto nacional al carbono y programas de eficiencia energética. Por tanto, las variaciones en los escenarios reflejan un efecto combinado de instrumentos climáticos, donde el ETS constituiría un componente complementario y medible dentro de una estrategia nacional más amplia de descarbonización. En consecuencia, su adopción debería articularse con políticas sectoriales y con mecanismos internacionales de cooperación bajo el Artículo 6 del Acuerdo de París para maximizar su efectividad y sostenibilidad.

Figura 4: Resultados de análisis de escenarios. Efectos del ETS en CO₂ per cápita para Colombia



Fuente: Elaboración propia a partir de modelos de aprendizaje automático en Python.

5. Discusión

El análisis de este estudio revela que, si bien la relación entre el crecimiento económico y el total de GEI en Colombia no es concluyente, se identifica un patrón claro y robusto para el caso específico de las emisiones de CO₂ de origen fósil. Los resultados econométricos muestran una relación lineal positiva y significativa entre el PIB per cápita y estas emisiones. Si bien esta relación no corresponde a la forma de “U invertida” propuesta por la hipótesis clásica de la EKC, es compatible con su fase ascendente, lo que indica que el país aún no ha alcanzado el punto de inflexión en el que el crecimiento económico se asocia con reducciones en las emisiones de GEI. Este hallazgo sitúa a Colombia en una etapa donde la expansión económica continúa siendo el principal motor de las emisiones de CO₂.

El análisis histórico de largo plazo refuerza esta interpretación (apéndice A.2.1 y A.2.2). Entre 1960 y 2023, el PIB per cápita de Colombia creció un 251.1 %, mientras que las emisiones de CO₂ per cápita (sin cambio de uso del suelo) aumentaron un 92.5 %, y las emisiones totales de GEI per cápita se redujeron en un 76.1 %. Estos resultados evidencian un desacople relativo entre crecimiento económico y emisiones de CO₂ —estimado en 36.8 %— y un desacople absoluto en el caso de los GEI totales (−30.3 %). Esto sugiere que la economía colombiana ha mejorado su eficiencia ambiental y energética, aunque aún no alcanza una trayectoria de reducción sostenida en las emisiones de origen fósil.

En otras palabras, Colombia ha logrado crecer con una menor intensidad de carbono, lo que indica progresos hacia un modelo de desarrollo más sostenible, pero todavía se mantiene en la fase ascendente de la EKC. Esta dinámica explica por qué la relación estimada entre PIB per cápita y emisiones de CO₂ sigue siendo positiva y significativa, subrayando la necesidad de instrumentos de precio de carbono y el Artículo 6 en el marco del Acuerdo de París.

Asimismo, los hallazgos de este respaldan la idea de que existe un efecto de composición y escala que impide que el país desacople su crecimiento económico de las emisiones de CO₂. Mientras la estructura productiva permanezca vinculada a la composición de los insumos energéticos y al tipo de producción, cada vez que la economía crezca, sus emisiones aumentarán a una tasa constante. De acuerdo con la base de datos de “Our World in Data” (Ritiche, et al.,2023), en el período 1960-2020, el aumento en las emisiones per cápita de CO₂ para el sector energético e industrial se debe principalmente al incremento en el consumo per cápita de petróleo, que pasó de 0.5t a 1.14t, y de gas, que subió de 0.04t a 0.42t (apéndice A.3.1).

Estos resultados, sin embargo, no son generalizables a todos los GEI, ya que en el último período analizado la correlación es casi nula (-0.005). Esto se explica por la influencia del CO₂ en las emisiones totales, especialmente considerando el cambio en el uso del suelo. La participación del CO₂ en las emisiones ha sido significativa, alrededor del 72%, con el cambio de uso del suelo contribuyendo en un 61.6% de este total. Sin incluir el cambio de uso del suelo, las emisiones de CO₂ aumentaron de 1.3 t a 1.7 t (29%) durante el período de análisis; sin embargo, al considerar el cambio de uso del suelo, estas presentan un aumento leve de 3.9 t a 4.13 t (solo un 5%).

A partir de 2003 hasta 2009, las emisiones aumentaron con una tasa de crecimiento anual compuesta del 0.3%, coincidiendo con la consolidación de políticas de conservación, como la creación del Sistema Nacional de Áreas Protegidas y el reconocimiento de territorios colectivos. Estos factores pueden haber ayudado a reducir la deforestación y las emisiones correspondientes. Por otro lado, las emisiones de CH₄ han aumentado, pasando de un 19.8% a un 24.3% en su participación, principalmente debido a la fermentación entérica del ganado (IDEAM, 2021).

Los resultados de la EKC para CO₂ obtenidos en este estudio sugieren que la implementación de un ETS podría acelerar la transición de Colombia hacia una economía baja en carbono, en línea con la experiencia de otros países aún no desacoplados que han adoptado este tipo de instrumentos. La teoría de la curva ambiental de Kuznets plantea que, antes del punto de inflexión, la relación entre el PIB per cápita y las emisiones de CO₂ es positiva, lo cual se confirma en el caso colombiano. Estos hallazgos son coherentes con los resultados internacionales de Jung y Song (2023), quienes identificaron una EKC en forma de U para países desacoplados y una relación lineal positiva para aquellos que no lo están. También guardan relación con los resultados nacionales de Acevedo y Ramos (2023) y Sosa y Navarro (2020)

De manera específica, Jung & Song (2023) encontraron evidencia para la EKC en forma de U y gamma para países desacoplados, y EKC lineal positiva para países no desacoplados en una muestra de 26 países para el periodo de 1960 - 2019. Se resalta el hecho que mientras que el grupo de países africanos ha pasado de niveles cercanos a 0.2 t a 1.2 t; el grupo de países suramericanos ha pasado de 1.5 t a 3 t donde ya están cerca de alcanzar su punto de inflexión. Un dato clave es el caso del grupo de los países de América del Norte donde los niveles bajaron bruscamente al pasar de niveles cercanos a 13 t para luego permanecer en niveles estables alrededor de 6 t. Europa por su parte presenta una EKC en forma de U invertida que comienza en niveles mayores a 5 t para alcanzar niveles mayores a 9 t y bajar a niveles mayores a 7 t de forma gradual. De esta manera los resultados de este estudio permiten confirmar que Colombia está en los rangos de los países sudamericanos.

Los resultados de la EKC frente a CO₂ de este estudio permiten soportar el planteamiento en el cual un ETS podría hacer que Colombia presente un comportamiento similar al de países no desacoplados en donde el ETS sirve como un mecanismo adicional que acelera la transición hacia una economía baja en carbono; particularmente si se complementa con otras políticas tales como subsidios a energías renovables y otras políticas de mitigación. De hecho, la teoría sugiere que antes de que ocurra el desacoplamiento, la relación entre el PIB per cápita y las emisiones de CO₂ debería ser positiva. Esta relación se observó en países no desacoplados que no adoptaron un ETS, mientras que los países que sí lo adoptaron mostraron una disminución en las emisiones de carbono durante la década de 2010 que sugiere que estos países ya han alcanzado el punto de inflexión (Jung & Song, 2023).

Ahora bien, conviene tener en cuenta los factores clave para el éxito de los ETS incluyen un precio de carbono estable y predecible, fundamental para que las empresas planifiquen inversiones en tecnologías limpias. Otro elemento importante es la amplia cobertura del mercado: cuantos más sectores se incluyan, mayor será la efectividad del ETS en la reducción de GEI. El ETS Europeo es el sistema más grande que abarca sectores clave de la economía europea. Por su parte, Nueva Zelanda incluye ocho sectores y cubre el 48% de sus emisiones, mientras que Corea abarca siete sectores, cubriendo el 68% de sus emisiones (ICAP, 2024).

Otros factores clave para el éxito de los ETS son la generación de incentivos para la innovación y el desarrollo de tecnologías bajas en carbono, así como la integración de diferentes ETS en un mercado más amplio. Por ejemplo, el sistema europeo ha fomentado inversiones significativas en innovación tecnológica y ha integrado su ETS con los de Suiza y Noruega, para aumentar la conectividad (ICAP, 2022).

La implementación de los ETS debe ser cuidadosamente planificada y respaldada por un compromiso político a largo plazo. Es esencial que el diseño del sistema sea flexible para adaptarse a cambios económicos o sociales. Además, debe garantizarse la transparencia en la asignación de derechos y la información sobre emisiones, así como una supervisión adecuada para prevenir fraudes. Una regulación sólida es crucial para mantener un monitoreo y reporte riguroso de emisiones, asegurando una asignación de derechos de emisión de forma transparente y eficiente (ICAP 2024; Eden, et al., 2018).

Implicaciones del estudio

Este análisis tiene importantes implicaciones para las políticas públicas en Colombia. La adopción de un ETS no solo contribuiría a estabilizar las emisiones en sectores clave, sino que también mejoraría la competitividad económica en el contexto internacional al internalizar los costos de las

externalidades ambientales. Este tipo de instrumentos permite que las empresas incorporen el costo del carbono en sus decisiones económicas, incentivando prácticas más limpias, eficientes e innovadoras. Además, prepararía al país frente a la implementación de mecanismos como el Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono (por sus siglas en inglés: CBAM) de la Unión Europea, que aplicará restricciones comerciales a productos con alta huella de carbono (European Commission, 2025).

No obstante, para garantizar una transición energética efectiva, es fundamental complementar el ETS con otros instrumentos que fomenten la adopción de tecnologías limpias y la modernización progresiva de los sectores industriales y energéticos.

Desde una perspectiva integral y alineada con el cumplimiento de la NDC, el sector AFOLU juega un papel estratégico, ya que representa el 55.1% de las emisiones de GEI en Colombia. Sin embargo, este sector no está contemplado aun en el PNCTE, lo que deja un vacío en la estrategia de mitigación. En este contexto, Colombia tiene la oportunidad de aprovechar la generación de créditos de carbono tanto en un mercado doméstico regulado por un ETS como a través de esquemas de cooperación internacional bajo el Artículo 6 del Acuerdo de París.

Si bien un ETS nacional permitiría reducir emisiones de manera costo-efectiva en sectores industriales y energéticos, los créditos de carbono provenientes de proyectos en el sector AFOLU podrían complementar este esquema. La integración de ambos mecanismos maximizaría los beneficios económicos y ambientales, ya sea mediante su incorporación al ETS o su comercialización en mercados internacionales de carbono. En este sentido, las soluciones basadas en la naturaleza —como la reforestación y el desarrollo de bioeconomías a partir del uso sostenible del bosque— se perfilan como estrategias clave para alcanzar la meta de cero emisiones netas. Esto permitiría a Colombia aprovechar su ventaja comparativa en captura de carbono y consolidarse como un actor relevante en el cumplimiento de las metas de NDC de otros países

Limitaciones y Futuros Estudios

Este estudio se enfoca en el impacto de un ETS en Colombia, pero no aborda el impacto de la participación en mercados internacionales de resultados de mitigación - ITMOs (Resultados de Mitigación Transferido Internacionalmente) en el marco del Artículo 6 del Acuerdo de París, lo que representa una limitación en el análisis. Dado que el Acuerdo de París permite ambos mecanismos, interno e internacional, una línea de investigación futura podría explorar distintos escenarios: la implementación de un ETS nacional, la participación en la venta de ITMOs generados en sectores con potencial como el AFOLU o una combinación de ambos. Comparar estas estrategias permitiría evaluar su impacto en la reducción de emisiones, el desarrollo económico y el impacto como

vehículos de financiamiento climático. Asimismo, futuras investigaciones podrían analizar efectos sectoriales del ETS, costos de mitigación, oportunidades de financiamiento y el impacto de diferentes precios del carbono en la competitividad industrial y la inversión en tecnologías limpias.

6. Conclusión

Los resultados de este estudio muestran que la hipótesis de la Curva Ambiental de Kuznets (EKC) tiene una aplicabilidad parcial para Colombia. La relación entre el PIB per cápita y las emisiones de CO₂ industriales y por quema de combustibles presenta una tendencia lineal positiva, lo que sugiere que el país aún se encuentra en la fase ascendente de la curva, sin haber alcanzado el punto de inflexión que marcaría el desacople absoluto entre crecimiento y emisiones. En cambio, las emisiones totales de GEI no evidencian una relación clara con el crecimiento económico, debido al comportamiento inestable de las emisiones derivadas del cambio de uso del suelo.

El análisis histórico revela un desacople relativo del 36.8 % entre el crecimiento económico y las emisiones de CO₂, y un desacople absoluto del -30.3 % para el total de GEI, lo que indica avances en eficiencia ambiental, aunque aún insuficientes. Estos resultados subrayan la necesidad de una política climática integral que combine instrumentos de mercado —como el Sistema de Comercio de Emisiones (ETS) y la implementación del componente de mercado del Artículo 6 del Acuerdo de París— con estrategias de eficiencia energética, innovación tecnológica y transformación productiva, incluyendo medidas de descarbonización en el sector de uso del suelo y silvicultura (LULUCF). En este sentido, el estudio constituye un insumo clave para investigaciones futuras orientadas a evaluar los impactos del ETS y su articulación con mecanismos internacionales de cooperación climática.

7. Agradecimientos

Se extiende reconocimiento a los integrantes del Grupo de Estudios Económicos para el Desarrollo Sostenible de la Dirección de Ambiente y Desarrollo Sostenible del DNP —Camilo Andrés Díaz Campos, David Andrés Peña Pérez y Marly Verónica García Castrillón— por sus valiosos insumos y reflexiones durante la ejecución del estudio.

Asimismo, se agradece a Andrés Camilo Álvarez Espinosa, Alexander Rincón Pérez y Jairo Antonio Ceballos Sandoval por sus comentarios y observaciones, que contribuyeron significativamente al fortalecimiento técnico y analítico del documento.

8. Bibliografía:

- Acevedo-Ramos, J. A., Valencia, C. F., & Valencia, C. D. (2023). The Environmental Kuznets Curve Hypothesis for Colombia: Impact of Economic Development on Greenhouse Gas Emissions and Ecological Footprint. *Sustainability*, 15(4), 3738. <https://doi.org/10.3390/su15043738>
- Alvarez-Espinosa (2024). Descarbonización y Costos Efectivos: Evaluación del Impacto de Sistema de Comercio de Emisiones en Colombia en Equilibrio Parcial. *Archivos de Economía*, 566. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Estudios%20Economicos/566.pdf>
- Asocarbono. (2024). *Informe del mercado de carbono en Colombia: Cierre a diciembre de 2024*. Asocarbono. <https://asocarbono.org/wp-content/uploads/2025/03/IMCC-Oct-Dic-2024.pdf>
- Banco de la República. (2000). *Informe anual 2000*. Bogotá, Colombia: Banco de la República. Recuperado de <https://www.banrep.gov.co/docum/ftp/borra157.pdf>
- Blanco-Camargo, D., Henríquez-Orozco, S., Fajardo-Ortiz, E., & Romero-Valbuena, H. (2020). Consumption of Energy, Economic Growth, and Carbon Dioxide Emissions in Colombia. *Revista Fuentes el Reventón Energético*, 18(1), 41–50. https://www.researchgate.net/publication/343140673_Consumption_of_Energy_Economic_Growth_and_Carbon_Dioxide_Emissions_in_Colombia
- Catalán, H. (2014). Curva ambiental de Kuznets: implicaciones para un crecimiento sustentable. *Economía Informa*, 389, 19-31. [https://doi.org/10.1016/S0185-0849\(14\)72172-3](https://doi.org/10.1016/S0185-0849(14)72172-3)
- Boran, M., & Kayacan, B. (2023). The Economic Impact of the Paris Agreement on Sectoral Outputs in Türkiye: An Input-Output Approach. *Istanbul Journal of Economics / İstanbul İktisat Dergisi*, 73(1), 419–452. <https://doi.org/10.26650/istjecon2022-1211511>
- CBIT-GSP. (2024). *Programa de Entrenamiento Práctico sobre la presentación de información en el marco del Artículo 6 y el Artículo 13 del Acuerdo de París*. Retrieved October 29, 2024, from <https://climate-transparency-platform.org/about>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2023). *Estudio económico de América Latina y el Caribe, 2023: El financiamiento de una transición sostenible: inversión para crecer y enfrentar el cambio climático*. CEPAL. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/4740>
- Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M. et al., GHG emissions of all world countries - 2025 Report, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2025, [doi:10.2760/9816914](https://doi.org/10.2760/9816914), JRC143227.
- Diniz Oliveira, T., Costa Gurgel, A., & Tonry, S. (2019). International market mechanisms under the Paris Agreement: A cooperation between Brazil and Europe. *Energy Policy*, 129, 397–409. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.01.056>
- Diniz Oliveira, T., Costa Gurgel, A., & Tonry, S. (2021). Potential trading partners of a brazilian emissions trading scheme: The effects of linking with a developed region (Europe) and two developing regions (Latin America and China). *Technological Forecasting and Social Change*, 171. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120947>
- Döbbeling-Hildebrandt, N., Miersch, K., Khanna, T.M. et al. Systematic review and meta-analysis of ex-post evaluations on the effectiveness of carbon pricing. *Nat Commun* 15, 4147 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48512-w>

- Eden, A., Unger, C., Acworth, W., Wilkening, K., Haug, C., (2018, 30 de Octubre). Benefits of Emissions Trading. Taking Stock of the Impacts of Emissions Trading Systems Worldwide. Recuperado de https://icapcarbonaction.com/system/files/document/benefits-of-ets_updated-august-2018.pdf
- European Commission (2025) - "Carbon Border Adjustment Mechanism" Published online at Taxation and Custom Union. Retrieved from: 'https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en' [Online Resource]
- Ellerman, A. D., & Buchner, B. K. (2007). The European Union Emissions Trading Scheme: Origins, allocation, and early results. *Review of Environmental Economics and Policy*, 1(1), 66-87.
- GGGI. (2024). *Supporting Preparedness for Article 6 Cooperation* . Retrieved October 30, 2024, from <https://www.spar6c.org/>
- Grupo de Estudios del Crecimiento Económico (GRECO). (2002). El crecimiento económico colombiano en el siglo XX: aspectos globales. En *El crecimiento económico colombiano en el siglo XX* (pp. 33-80). Fondo de Cultura Económica; Banco de la República.
- Gobierno de Colombia. (2021). *Estrategia climática de largo plazo de Colombia 2050 para cumplir con el Acuerdo de París*.
- Grossman, G. M. and Krueger, A. B. (1991) *Environmental impacts of a North American free trade agreement*. NBER Working Paper, No. 3914. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research
- Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M. (2023). CO₂ and greenhouse gas emissions. Our World in Data. Consultado en diciembre de 2024. Recuperado de <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>.
- ICAP (2024). Emissions Trading Worldwide: Status Report 2024. Berlin: International Carbon Action Partnership.
- ICAP (2022, 30 de Octubre). EU Emissions Trading System (EU ETS). Recuperado de https://icapcarbonaction.com/es/ets_system/43
- IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, CANCELLEÍA (2021). Tercer Informe Bienal de Actualización de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC). IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, CANCELLEÍA, FMAM. Bogotá D.C., Colombia.
- Ideam, Minambiente, PNUD, Fundación Natura. 2024. Anexo 1: Documento del Inventario Nacional de Emisiones y Absorciones Atmosféricas de Colombia. Gases de efecto invernadero (1990-2021). Contaminantes criterio y carbono negro (2010-2021). Primer informe bienal de transparencia (BTR 1) de Colombia. Bogotá D.C., Colombia.
- IETAA6_CapstoneReport*. (2023).
- IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- Jung, H., & Song, C. K. (2023). Effects of emission trading scheme (ETS) on change rate of carbon emission. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28154-6>

- Kaufmann, R. K., Kauppi, P., Stock, J. H., & Zaim, F. (1998). The determinants of atmospheric SO₂ concentrations: reconsidering the environmental Kuznets curve. *Ecological Economics*, 25(2), 209-220.
- Kalmanovitz, S., & López, E. (2006). *Nueva historia económica de Colombia*. Taurus.
- Kuznets, S. (1955). Economic growth and income inequality. *American Economic Review*, 45.
- Laverde-Rojas, H., Guevara Fletcher, D. A., & Camacho-Murillo, A. (2021). *Economic growth, economic complexity, and carbon dioxide emissions: The case of Colombia*. *Heliyon*, 7(6), e07188. doi: [10.1016/j.heliyon.2021.e07188](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07188)
- Li, M., & Duan, M. (2021). Exploring linkage opportunities for China's emissions trading system under the Paris targets—EU-China and Japan-Korea-China cases. *Energy Economics*, 102. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105528>
- Li, Y., Zhao, J. (2026). The effectiveness of carbon emission trading system: Evidence from China's regional markets. *Journal of Development Economics*, 179. <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2025.103631>
- Minambiente. (2020). NDC actualizada de Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021).
- Minambiente (21 de octubre de 2024). Inventario Nacional de Emisiones y Absorciones de Gases de Efecto Invernadero – INGEI. Recuperado de <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/inventario-nacional-de-emisiones-y-absorciones-de-gases-de-efecto-invernadero-ingei/>
- Moomaw, W. R., & Unruh, G. C. (1997). Are environmental Kuznets curves misleading? The case of CO₂ emissions. *Economics Letters*, 57(1), 109-113.
- Nong, D., Nguyen, T. H., Wang, C., & Van Khuc, Q. (2020). The environmental and economic impact of the emissions trading scheme (ETS) in Vietnam. *Energy Policy*, 140. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111362>
- Oliveira, T. D., Gurgel, A. C., & Tonry, S. (2020). The effects of a linked carbon emissions trading scheme for Latin America. *Climate Policy*, 20(1), 1–17. <https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1670610>
- Panayotou, T. (1993) *Economic growth and the environment: A new focus*. CID Occasional Paper No. 56. Cambridge, MA: Center for International Development, Harvard University
- Panayotou, T. (1997). Demystifying the environmental Kuznets curve: turning a black box into a policy tool. *Environment and Development Economics*, 2(4), 465-481.
- Stern, D. I. (2003). The environmental Kuznets curve debate: toward a spatial econometric approach. *Applied Economics*, 35(5), 519-524.
- Sosa, P. V. y Navarro, D. M. (2020). Crecimiento, complejidad económica y emisiones de CO₂: un análisis para Colombia. *Revista CIFE: Lecturas de Economía Social*, 22(37), 21-41. <https://doi.org/10.15332/22484914/6039>
- UNFCCC. (2016). The Paris Agreement. United Nations Framework Convention on Climate Change.
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2020). *Plan Energético Nacional 2020-2050: La transformación energética que habilita el desarrollo sostenible*. UPME. https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN_2020_2050/Plan_Energético_Nacional_2020_2050.pdf

Umaña, C. (2011) Una evaluación de la estrategia comercial de Colombia a la luz de un modelo de equilibrio general computable basado en la ecuación de gravedad. *Planeación y Desarrollo. Departamento Nacional de Planeación, Volumen XLII*

Wang, Q., Gao, C., & Dai, S. (2019). Effect of the Emissions Trading Scheme on CO2 abatement in China. *Sustainability (Switzerland)*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/su11041055>

Wang, M; & Kuusi, T. (2024). Trade flows, carbon leakage, and the EU Emissions Trading System. *Energy Economics*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107556>

World Bank (2023). State and Trends of Carbon Pricing 2023. Washington, DC: World Bank. doi: 10.1596/978-1-4648-2006-9. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO.

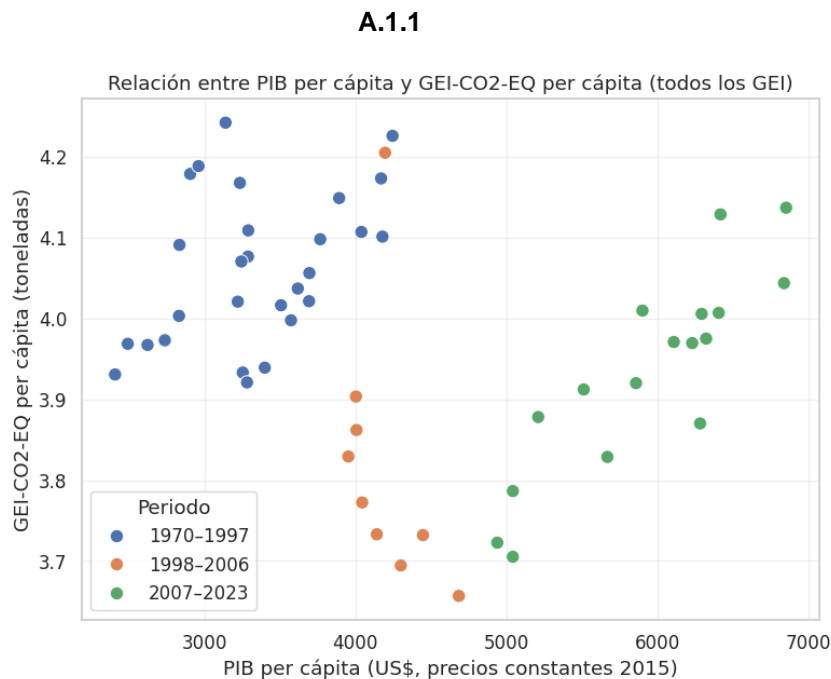
Zhang, X., Qi, T. yu, Ou, X. min, & Zhang, X. liang. (2017). The role of multi-region integrated emissions trading scheme: A computable general equilibrium analysis. *Applied Energy*, 185, 1860–1868. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.092>

Zhang, Y., & Zhang, J. (2019). Estimating the impacts of emissions trading scheme on low-carbon development. *Journal of Cleaner Production*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117913>

Apéndices

A.1 Análisis correlacional con base de datos EDGAR

La Figura A.1.1 presenta la correlación entre PIB per cápita y todos los GEI en términos equivalentes. Se excluyen la quema de biomasa a gran escala, la quema de sabana, los incendios forestales y las fuentes y sumideros derivados del uso de la tierra, el cambio de uso de la tierra y la silvicultura (UTCUTS). Más información aquí: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/dataset_ghg2024#p1m

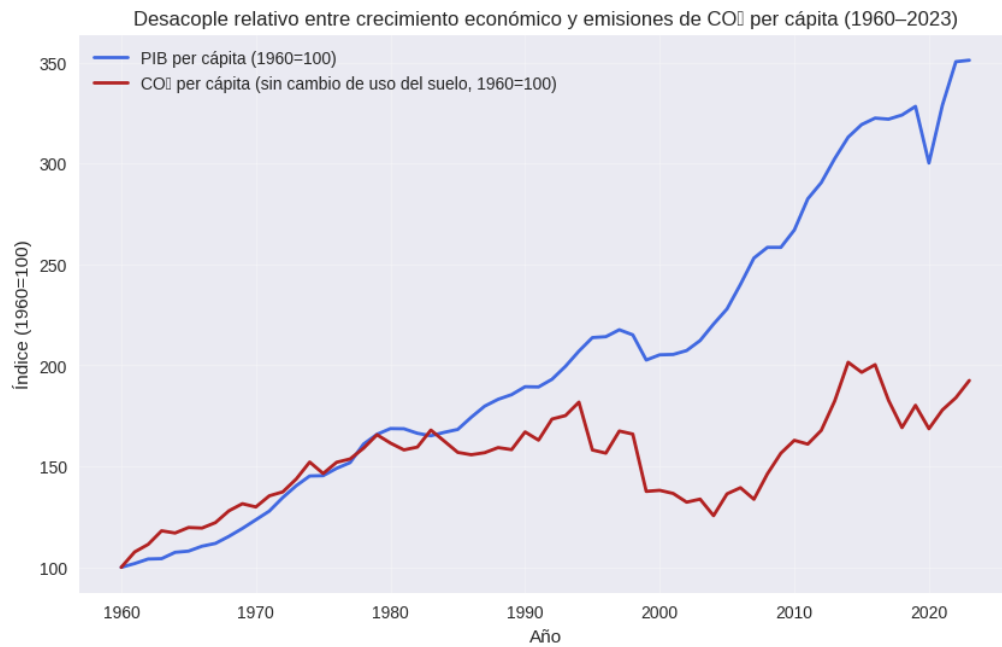


A. 2
gráfica de desacople relativo

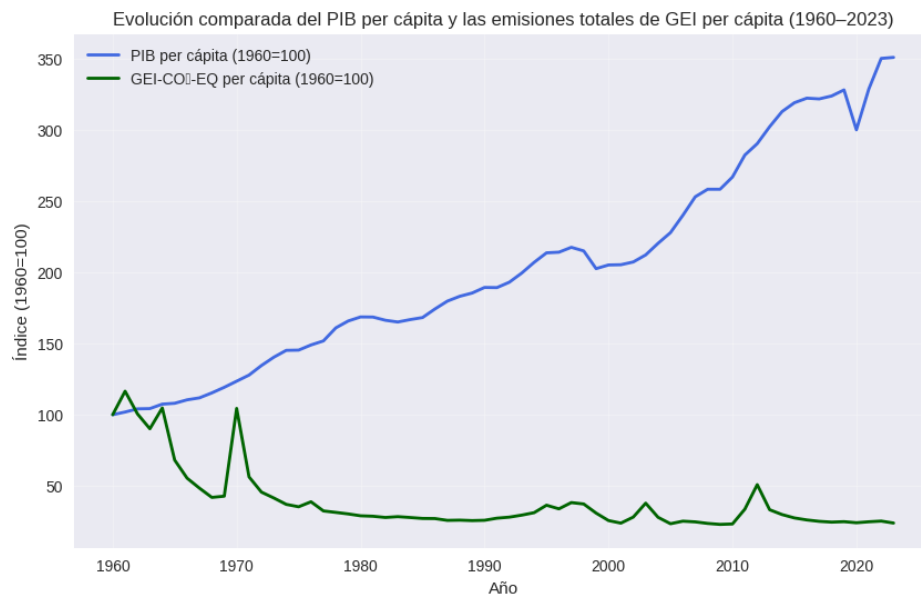
Evidencia

El análisis histórico revela un desacople relativo del 36.8 % entre el crecimiento económico (Figura A.2.1) y las emisiones de CO₂, y un desacople absoluto del -30.3 % para el total de GEI (Figura A.2.2).

A.2.1



A.2.2



A.3. Crecimiento per cápita de emisiones energéticas e industriales con base de datos Our World in Data

Las emisiones del sector industrial y energético aun presentan una tendencia creciente en sus principales componentes petróleo y gas. Mas información aquí: <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>

