DOI: https://doi.org/10.5154/r.rchsat.2025.12.003

e-ISSN: 2954-3886

Section: Natural Resources / Sección: Recursos Naturales

CC BY NC ND

EN

CO_2 Emissions and environmental pressure factors in Mexico and Ecuador: economy, population and environmental management

ES

Emisiones de CO_2 y factores de presión ambiental en México y Ecuador: economía, población y gestión ambiental

Abril Yuriko Herrera-Ríos[1]*; Lizbeth Guadalupe Galaz-Rivera[1]; Rosa Mayra Llerena-Guevara[2]

[1]Universidad Autónoma de Sinaloa. Av. de las Américas, Unidad 3 s/n, C. P. 80010, Culiacán, Sinaloa, México.

[2]Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador.

***Corresponding author:**
yurikoherrera@uas.edu.mx

Received: December 16, 2025
Accepted: April 14, 2026
Published online:
June 22, 2026

Abstract

This study analyzed the relationship between economic activity, demographic and environmental pressures, and carbon dioxide (CO_2) emissions in Mexico and Ecuador. Using a Spatial Error Model (SEM), data from 56 subnational entities in both countries were integrated, incorporating Gross Domestic Product, the logarithm of the population, and wastewater volume as explanatory variables. The dependent variable was annual (CO_2) emissions per entity. The spatial weight matrix was constructed based on the five nearest neighbors' criterion with geographic coordinates. The results show a significant spatial effect on the model residuals ($\lambda = -0.144$, $p < 0.01$), justifying the use of the SEM approach. Emissions were positively associated with population and wastewater, while gross domestic product (GDP) showed a marginal negative relationship. This joint analysis allows for the identification of common territorial patterns of environmental pressure in Latin America, providing a basis for the design of differentiated and sustainable policies.

Keywords: air pollution; carbon emissions; environmental education; sustainability.

Resumen

Este trabajo analizó la relación entre actividad económica, presión demográfica y ambiental con las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) en México y Ecuador. A través de un modelo econométrico espacial del tipo Modelo de Error Espacial (Spatial Error Model [SEM] por sus siglas en inglés), se integraron datos de 56 entidades subnacionales de ambos países, incorporando como variables explicativas el Producto Interno Bruto, el logaritmo de la población y el volumen de agua residual. La variable dependiente fue la emisión anual de CO_2 por entidad. La matriz de pesos espaciales se construyó bajo el criterio de los cinco vecinos más cercanos utilizando coordenadas geográficas. Los resultados muestran un efecto espacial significativo en los residuos del modelo ($\lambda = -0.144$, $p < 0.01$), lo que justifica el uso del enfoque SEM. Las emisiones se asociaron de forma positiva con la población y el agua residual, mientras que el producto interno bruto (PIB) mostró una relación negativa marginal. Este análisis conjunto permite identificar patrones territoriales comunes de presión ambiental en América Latina, proponiendo una base para el diseño de políticas diferenciadas y sostenibles.

Palabras clave: contaminación atmosférica; emisiones de carbono; educación ambiental; sostenibilidad.

Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical

Please cite this article as follows (APA 7): Herrera-Ríos, A. Y., Galaz-Rivera, L. G., & Llerena-Guevara, R. M. (2026). CO^2 Emissions and environmental pressure factors in Mexico and Ecuador: economy, population and environmental management. *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, *6*, e25003. doi: https://doi.org/10.5154/r.rchsat.2025.12.003

Introduction

Climate change has become one of the main challenges worldwide, therefore requiring accurate territorial diagnoses with rigorous approaches to understand the factors associated with this environmental degradation (Organization for Economic Cooperation and Development [OECD] et al., 2022). Among the many indicators used to assess this phenomenon, carbon dioxide (CO_2) emissions stand out as the most studied variable due to their direct relationship with economic activity, urban growth, and inefficient management of natural resources (Balza et al., 2024). Developing countries stand out as those facing the most significant challenges in the face of climate change. This is mainly explained by fragile institutional structures, corruption, persistent territorial inequalities, and limitations in their technical and financial capacity to manage resources in the face of vulnerability and specifically regarding sustainability issues (Comisión Económica para América Latina y El Caribe [CEPAL by its Spanish acronym], 2022; Riveros-Gavilanes & Reyes-Vargas, 2023).

In the debate surrounding the relationship between the economy and the environment, one of the most discussed approaches has been the Environmental Kuznets Curve (EKC). It posits that there is a relationship between economic growth and environmental degradation that is not linear but rather follows an inverted U-shaped trajectory. This approach is based on the studies of Grossman & Krueger (1991).

In general, the EKC suggests that, in the early stages of development, as a country's per capita income increases, so does its pollution, due to the intensive use of natural resources (Grossman & Krueger, 1991). However, once a certain income threshold is reached, the same country is expected to allocate more resources to education, innovation, technology, energy efficiency, and environmental regulation, leading to a gradual reduction in polluting emissions.

The EKC theory has been extensively studied and debated in different contexts, regions, and countries over time. For example, it has been observed that industrialized economies tend to illustrate this pattern more clearly, whereas in middle- and low-income countries the results have been more ambiguous. In this regard, research such as Afifi's (2012) shows that the validity of the hypothesis varies according to income level, and that in Latin America the results tend to be heterogeneous due to the influence of institutional, demographic, and geographic factors. Recent studies have also highlighted the role of governance quality and economic complexity as determinants that shape countries' environmental trajectories (Muñoz-Ramos & Osorio-Caballero, 2023).

Introducción

El cambio climático se ha convertido en uno de los principales desafíos a nivel mundial, requiriéndose por ello de diagnósticos territoriales precisos, que cuenten con enfoques rigurosos, que permitan comprender cuáles son los factores asociados a ese deterioro ambiental (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico [OCDE] et al., 2022). Dentro de los múltiples indicadores que se emplean para evaluar este fenómeno se encuentran principalmente las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), las cuales han sido la variable más estudiada porque destacan por su relación directa con la actividad económica, el crecimiento urbano y la gestión ineficiente de los recursos naturales (Balza et al., 2024). En particular, los países en desarrollo se distinguen por ser los que enfrentan retos más significativos frente al cambio climático, esto se explica principalmente por estructuras institucionales frágiles, corrupción, persistencia de desigualdades territoriales y limitaciones en su capacidad técnica y financiera para gestionar recursos frente a situaciones de vulnerabilidad y específicamente para temas sostenibles (Comisión Económica para América Latina y El Caribe [CEPAL], 2022; Riveros-Gavilanes & Reyes-Vargas, 2023).

En el debate de la relación entre economía y medio ambiente, uno de los enfoques que más se ha discutido ha sido la curva ambiental de Kuznets (CAK). La cual plantea que existe una relación entre crecimiento económico y degradación ambiental que no es lineal, sino que se sigue una trayectoria con forma de U invertida. Enfoque basado en los estudios de Grossman & Krueger (1991).

De forma general, la CAK sugiere que, en las primeras fases de desarrollo un país incremente la renta per cápita y aumenta de la misma forma la contaminación, esto se asocia por el uso intensivo de los recursos naturales (Grossman & Krueger,1991). Sin embargo, una vez superado un umbral de ingresos, se espera que el mismo país destine más recursos a la educación, innovación, tecnología, la eficiencia energética y regulación ambiental, lo que ocasione una reducción progresiva de las emisiones contaminantes.

La teoría de la CAK ha sido ampliamente estudiada y debatida en distintos contextos, regiones, países, a través del tiempo. Por ejemplo, se ha observado que las economías industrializadas tienden a mostrar con mayor claridad este patrón, mientras que en países de renta media o baja los resultados han sido más ambiguos. En este sentido, investigaciones como la de Afifi (2012) evidencian que la validez de la hipótesis varía de acuerdo con el nivel de ingreso, y que en América Latina los resultados suelen ser heterogéneos debido a la influencia de factores institucionales, demográficos y geográficos.

Over the past two decades, numerous studies have attempted to validate or refute the EKC hypothesis in Latin America. For example, Alzate-Rodríguez (2022) studied the relationship between economic growth and deforestation in Colombia from the EKC's perspective and discovered inconsistent patterns where environmental degradation depends not only on income but also on critical territorial factors such as local governance and land use conflicts. Similarly, Terán-Pérez et al. (2025) examined 25 countries in the Americas between 2010 and 2020, finding empirical evidence supporting the existence of an inverted U-shaped curve. This study demonstrated that variables such as electricity consumption, foreign trade, and environmental taxes exhibit the expected signs and significance. However, most of these analyses have used conventional linear econometric models that tend to obscure territorial complexity. Furthermore, most approaches ignore spatial interactions between regions, even though pollution and environmental policy decisions are not confined to administrative boundaries. Therefore, it is a priority to develop empirical models that incorporate a spatial and territorial dimension to more accurately understand the emission patterns that persist when considering spatial dynamics across the 56 territorial units in this study.

Mexico has a larger-scale economy and a diversified productive structure, although marked inequalities persist between the industrialized north and the predominantly agricultural south (Elenes et al., 2024). Furthermore, the country has promoted various environmental policy instruments, such as the General Law on Climate Change, the Pollutant Release and Transfer Register (PRTR), the Regulations of the General Law on Ecological Balance and Environmental Protection regarding air pollution, and the Mexican Official Standard NOM-085-SEMARNAT-2011, aimed at controlling emissions from stationary sources (Ministry of the Environment and Natural Resources [Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT by its Spanish acronym], 2022). However, the effective implementation of these measures has been limited in some regions due to institutional gaps. Ecuador, for its part, has historically faced challenges stemming from its high environmental vulnerability and its dependence on extractive sectors, particularly oil and mining. Despite legislative advances, such as the inclusion of the rights of nature in its 2008 Constitution, technical and financial limitations persist in implementing effective environmental policies at the provincial level (Alvarado et al., 2024). For this reason, the choice of a spatial econometrics model is consistent with studies that have estimated emissions from sectoral inventories, such as the one presented by Meza-López et al. (2021).

Estudios recientes también han destacado el papel de la calidad del gobierno y de la complejidad económica como determinantes que moldean la trayectoria ambiental de los países (Muñoz-Ramos & Osorio-Caballero, 2023).

En las últimas dos décadas, se han reproducido los estudios que intentan validar o refutar la hipótesis de la CAK en América Latina. Por ejemplo, Alzate-Rodríguez (2022) estudió la relación entre el crecimiento económico y la deforestación en Colombia desde la perspectiva de la CAK y descubrió patrones inconsistentes donde la degradación ambiental no depende únicamente del ingreso, sino de factores territoriales críticos como la gobernanza local y los conflictos de uso de. De forma similar, Terán-Pérez et al. (2025) examinaron 25 países del continente americano entre 2010 y 2020, encontrando evidencia empírica que respalda la existencia de una forma de U invertida. En dicho estudio, se demostró que las variables como el consumo eléctrico, el comercio exterior y los impuestos ambientales presentan los signos esperados y significancia. Sin embargo, la mayoría de estos análisis han utilizado modelos econométricos lineales convencionales que tienden a ocultar la complejidad territorial. Además, la mayoría de los enfoques ignoran las interacciones espaciales entre regiones, a pesar de que la contaminación y las decisiones sobre políticas ambientales no se limitan a las fronteras administrativas. Por tanto, es prioritario desarrollar modelos empíricos que incorporen una dimensión espacial y territorial para comprender con mayor precisión los patrones de emisiones se mantienen al considerar las dinámicas espaciales en las 56 unidades territoriales de este estudio.

México cuenta con una economía de mayor escala y una estructura productiva diversificada, aunque persisten marcadas desigualdades entre el norte industrializado y el sur predominantemente agrícola (Elenes et al., 2024). Además, el país ha impulsado diversos instrumentos de política ambiental, como la Ley General de Cambio Climático, el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC), el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de contaminación atmosférica, y la Norma Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-2011, orientada al control de emisiones de fuentes fijas (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2022). No obstante, la aplicación efectiva de estas medidas ha sido limitada en algunas regiones debido a brechas institucionales. Ecuador, por su parte, ha enfrentado históricamente desafíos derivados de su alta vulnerabilidad ambiental y su dependencia de sectores extractivos, particularmente petróleo y minería. A pesar de avances legislativos, como la inclusión de los derechos de la naturaleza en su Constitución de 2008, persisten limitaciones técnicas y financieras para implementar políticas

This research sought to contribute to this effort by conducting a comparative analysis between Mexico and Ecuador, two Latin American countries with intermediate levels of development, comparable *per capita* emissions, and a significant number of entities for territorial analysis. Both countries have different trajectories in terms of economic growth, institutional capacity, and environmental pressure, as well as accelerated processes of urbanization, partial industrialization, and expansion of energy consumption in recent decades, which have led to a notable increase in CO_2 emissions. However, their productive structures, governance systems, and levels of investment in environmental infrastructure present contrasts that justify a detailed comparison (OECD, 2023; Guevara-Segarra et al., 2025).

Given the above, the analysis of fifty-six regions (thirty two states in Mexico and twenty four provinces in Ecuador) made it possible to capture the territorial heterogeneity of these phenomena, while the spatial analysis showed differences in the intensity of dimensions between regions, reinforcing the suitability of a spatial econometric approach (Mahmood, 2023).

Furthermore, both countries are considered representative of the environmental challenges of Latin America, a region characterized by its high biodiversity, its dependence on natural resources, and the institutional weaknesses of many of its territories (CEPAL, 2024). Both countries have reliable subnational statistical data on emissions, population, gross domestic product (GDP), and wastewater treatment, which allows for using the same methodological design. It is worth noting that, in the case of Ecuador, the Kuznets' perspective has already been used to study structural phenomena such as inequality, reinforcing its methodological relevance in environmental analysis (Enríquez-Fuenmayor, 2020). Finally, the choice of these two countries allows for further progress in the study of EKC from a more localized, territorialized, and complementary empirical approach.

The Spatial Error Model (SEM) is part of the family of spatial econometric models used to analyze phenomena in which variables exhibit interdependence between neighboring geographic units. Unlike traditional models, the SEM explicitly incorporates autocorrelation into the errors, which helps avoid biased estimates when the residuals exhibit spatial patterns (Anselin, 1988). Thus, this technique was used to assess whether the relationship between GDP, population, and wastewater volume with CO_2 emissions exhibited different dynamics among the 32 Mexican states and the 24 Ecuadorian provinces. The use of SEM not only allows for the correction of spatial autocorrelation in waste, but also captures the influence of neighboring regions on

ambientales eficaces a nivel provincial (Alvarado et al., 2024). Por esta razón, la elección de un modelo de econometría espacial resulta consistente con trabajos que han estimado emisiones a partir de inventarios sectoriales, como el presentado por Meza-López et al. (2021).

Esta investigación buscó contribuir a este esfuerzo al realizar un análisis comparativo entre México y Ecuador, dos países latinoamericanos que tiene un nivel de desarrollo intermedio, emisiones *per cápita* comparables y una cantidad significativa de entidades para realizar análisis territorial. Ambos países cuentan con trayectorias diferentes en términos de crecimiento económico, capacidad institucional y presión ambiental, así como procesos acelerados de urbanización, industrialización parcial y expansión del consumo energético en las últimas décadas, lo que ha dado lugar a un notable incremento de las emisiones de CO_2. Sin embargo, sus estructuras productivas, sistemas de gobernanza y niveles de inversión en infraestructura medioambiental presentan contrastes que justifican una comparación detallada (OCDE, 2023; Guevara-Segarra et al., 2025).

Considerando lo anterior, el análisis de cincuenta y seis regiones (treinta y dos entidades en Mexico y veinticuatro provincias en Ecuador) posibilitó captar la heterogeneidad territorial de dichos fenómenos, mientras que la exploración espacial mostró diferencias en la intensidad de dimensiones entre regiones reforzando la idoneidad de un enfoque econométrico espacial (Mahmood, 2023).

Además, se considera que ambos países son representativos de los desafíos medioambientales de América Latina, una región caracterizada por su elevada biodiversidad, su dependencia de los recursos naturales y la debilidad institucional de muchos de sus territorios (CEPAL, 2024). Ambos países cuentan con datos estadísticos subnacionales fiables sobre emisiones, población, producto interior bruto (PIB) y tratamiento de aguas residuales, lo que permite realizar estimaciones comparables con un mismo diseño metodológico. Cabe destacar que, en el caso de Ecuador, la perspectiva de Kuznets ya se ha utilizado para estudiar fenómenos estructurales como la desigualdad, lo que refuerza su relevancia metodológica en el análisis ambiental (Enríquez-Fuenmayor, 2020). Por último, la elección de estos dos países permite avanzar en el estudio de la CAK desde un enfoque empírico más localizado, territorializado y complementario.

El Modelo de Error Espacial (SEM) forma parte de la familia de modelos econométricos espaciales utilizados para analizar fenómenos en los que las variables presentan dependencia entre unidades geográficas

local environmental conditions, which is particularly relevant given the high territorial heterogeneity of the 56 units analyzed.

Unlike previous studies that focused exclusively on a single country or on aggregate analyses, this work incorporates a comparative perspective that allows for the identification of patterns in the relationship between economic, demographic, and environmental variables. Therefore, it sought to answer a central question: how do patterns manifest in the relationship between economic growth, demographic pressure, and the quality of environmental management with respect to CO_2 emissions in Mexico and Ecuador? By addressing this question from a quantitative, territorial, and comparative perspective, the study aims to generate useful evidence for the design of sustainable public policies that take into account the specificities of each context.

Materials and methods

Study area

This study adopts a subnational comparative approach covering a total of 56 territorial units: 32 Mexican states and 24 Ecuadorian provinces. This breakdown allows for a more precise exploration of regional disparities in terms of emissions, productive structure, population concentration, and environmental services. Furthermore, by using 2020 data, a homogeneous and recent empirical base is ensured, reflecting environmental conditions following the consolidation of national climate policies.

The choice of Mexico and Ecuador stems from the importance of both countries within the Latin American context, since despite being considered developing economies, their characteristics differ, particularly in terms of their productive structures and the environmental pressures they face, which are the focus of this study. This difference allows us to observe the territorial dynamics associated with CO_2 emissions.

Subnational analysis also allows us to identify distinct patterns between regions that are not observable in studies at the national level, thereby contributing to the understanding of the territorial heterogeneity that characterizes the contexts of both countries.

Econometric methodology: combined SEM for Mexico and Ecuador

To analyze the relationship between GDP, population, wastewater generation, and CO_2 emissions in Mexico and Ecuador, a spatial econometric model of the Spa-

vecinas. A diferencia de los modelos tradicionales, el SEM incorpora explícitamente la autocorrelación en los errores, lo que permite evitar estimaciones sesgadas cuando los residuos muestran patrones espaciales (Anselin, 1988). De esta manera, se empleó dicha técnica para evaluar si la relación entre el PIB, la población y el volumen de aguas residuales con las emisiones de CO_2 presentaba una dinámica diferenciada entre las 32 entidades mexicanas y las 24 provincias ecuatorianas. El uso del SEM no solo permite corregir la autocorrelación espacial en los residuos, sino que también capta la influencia que ejercen las regiones vecinas sobre las condiciones medioambientales locales, lo que resulta especialmente relevante dada la alta heterogeneidad territorial de las 56 unidades analizadas.

A diferencia de estudios anteriores que se centraban exclusivamente en un solo país o en análisis agregados, el presente trabajo incorpora una perspectiva comparativa que permite identificar patrones entre la relación entre variables económicas, demográficas y ambientales. Por lo que buscó responder a una pregunta central: ¿cómo se manifiestan los patrones en la relación entre crecimiento económico, presión demográfica y calidad de la gestión ambiental respecto a las emisiones de CO_2 en México y Ecuador? Al abordar esta pregunta desde una perspectiva cuantitativa, territorial y comparativa, el estudio aspira a generar evidencia útil para el diseño de políticas públicas sostenibles que tomen en cuenta las especificidades de cada contexto.

Materiales y métodos

Área de estudio

Este estudio adopta un enfoque comparativo subnacional que abarca un total de 56 unidades territoriales: 32 estados de México y 24 provincias de Ecuador. Esta desagregación permite explorar con mayor precisión las disparidades regionales en términos de emisiones, estructura productiva, concentración poblacional y servicios ambientales. Además, al emplear datos del año 2020, se garantiza una base empírica homogénea y reciente que refleja las condiciones ambientales posteriores a la consolidación de políticas nacionales en materia climática.

La elección de México y Ecuador se debe a la importancia de ambos países dentro del contexto latinoamericano ya que, a pesar de ser considerados economías en desarrollo, las características de ambos son distintas, de manera estructural productiva y la presión ambiental objetos de este estudio. Esta diferencia nos permite observar las dinámicas territoriales que se asocian con las emisiones de CO_2.

tial Error Model (SEM) was used. This model captures spatial autocorrelation in errors not explained by the observed variables, which is relevant when there are indirect influences between neighboring regions not captured by the explanatory variables.

The choice of the SEM model is justified based on the results of Moran's statistic and the LM test, both of which confirmed the presence of spatial dependence in the residuals. The use of this approach aligns with the proposal by Anselin (1988), who highlights that this type of model is ideal when one seeks to account for unobserved spatial effects in contexts of high territorial heterogeneity, as is the case in Latin America.

SEM model specification

The model has the following structural form:

$$y = X\beta + \mu,\ \mu = \lambda W\mu + \varepsilon \quad (1)$$

Where y is the CO_2 emissions vector (dependent variable); X is the matrix of explanatory variables; β is the vector of parameters to be estimated; μ is the error term with spatial structure; W is the spatial weight matrix; λ is the spatial autocorrelation coefficient in the errors; and ε is the random error.

The spatial weight matrix was constructed based on the k-nearest neighbors (KNN) criterion, considering five geographic neighbors for each region. The centroids of each entity (thirty two states in Mexico and twenty four provinces in Ecuador) were used to calculate spatial proximity. Subsequently, the matrix was row-standardized to ensure proper interpretation of the spatial coefficients.

Variables included and expected signs

The model was estimated using cross-sectional data from 2020, based on a total of fifty six observations (32 states in Mexico and 24 provinces in Ecuador). The variables considered are described in Table 1.

GDP, as a measure of economic growth, is expected to have a positive effect on CO_2 emissions, particularly in contexts where development is closely linked to industrial sectors, intensive manufacturing, motorized transport, or energy generation based on fossil fuels (Grossman & Krueger, 1995). This relationship may be even more pronounced in regions lacking strict environmental regulations or where mitigation policies are weak or nonexistent. In this regard, higher GDP may reflect greater economic activity but also a proportional increase in energy demand, with direct implications for pollution levels (Dinda, 2004).

El análisis subnacional también permite detectar patrones diferenciados entre regiones que no son observables en estudios a nivel nacional, contribuyendo así a la comprensión de la heterogeneidad territorial que caracteriza los contextos de ambos países.

Metodología econométrica: modelo SEM combinado para México y Ecuador

Con el objetivo de analizar la relación entre el PIB, la población, la generación de agua residual y las emisiones de CO_2 en México y Ecuador, se utilizó un modelo de econometría espacial del tipo Modelo de Error Espacial (SEM). Este modelo permite capturar la autocorrelación espacial en los errores que no son explicados por las variables observadas, lo que resulta pertinente cuando existen influencias indirectas entre regiones vecinas no captadas por las variables explicativas.

La elección del modelo SEM se justifica con base en los resultados del estadístico de Moran y la prueba LM, los cuales confirmaron la presencia de dependencia espacial en los residuos. El uso de este enfoque se alinea con lo propuesto por Anselin (1988), quien destaca que este tipo de modelo es idóneo cuando se busca controlar por efectos espaciales no observados en contextos de alta heterogeneidad territorial, como ocurre en América Latina.

Especificación del modelo SEM

El modelo tiene la siguiente forma estructural:

$$y = X\beta + \mu,\ \mu = \lambda W\mu + \varepsilon \quad (1)$$

Donde y es el vector de emisiones de CO_2 (variable dependiente); X es la matriz de variables explicativas; β es el vector de parámetros a estimar; μ es el término de error con estructura espacial; W es la matriz de pesos espaciales; λ es el coeficiente de autocorrelación espacial en los errores; y ε es el error aleatorio.

La matriz de pesos espaciales se construyó con base en el criterio de k-vecinos más cercanos (KNN), considerando cinco vecinos geográficos para cada región. Se utilizaron los centroides de cada entidad (treinta y dos estados en México y veinticuatro provincias en Ecuador) para calcular la proximidad espacial. Posteriormente, la matriz fue estandarizada por filas para garantizar la interpretación adecuada de los coeficientes espaciales.

Variables incluidas y signos esperados

El modelo se estimó con datos de corte transversal correspondientes al año 2020, empleando un total de cincuenta y seis observaciones (32 entidades en México

Table 1. Variables included in the SEM model and sources by country.
Cuadro 1. Variables incluidas en el modelo SEM y fuentes por país.

Variable / Variable	Description / Descripción	Source (Ecuador) / Fuente (Ecuador)	Source (Mexico) / Fuente (México)	Expected sign / Signo esperado
CO_2 Emissions / Emisiones CO_2	Annual CO_2 emissions per entity (tons) / Emisiones anuales de CO_2 por entidad (toneladas)	Ministerio del Ambiente (MAE)	Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (PRTR by its international acronym)	—
GDP / PIB	Annual GDP per entity (millions of USD or constant pesos) / PIB anual por entidad (millones de USD o pesos constantes)	Banco Central del Ecuador (BCE)	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)	+
Log Population / Log Población	Natural logarithm of total population / Logaritmo natural de la población total	Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC)	Consejo Nacional de Población (CONAPO)	+
Wastewater / Agua residual	Annual volume of wastewater generated (millions of m^3) / Volumen anual de aguas residuales generadas (millones de m^3)	Ministerio del Ambiente (MAE)	Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)	+

Source: Authors' self-made based on MAE, INEC, BCE, CONAPO, INEGI, CONAGUA and PRTR data.
Fuente: Elaboración propia con base en información de MAE, INEC, BCE, CONAPO, INEGI, CONAGUA y RETC.

For its part, total population, measured logarithmically, is considered a "demographic proxy" of environmental pressure. Population growth implies greater urban concentration, territorial expansion, and increased waste generation, which is generally associated with higher CO_2 emissions. Similarly, the volume of wastewater generated is interpreted as an indicator of environmental burden, as it reflects both water consumption as well as the insufficient pollutant treatment. Therefore, both variables are expected to have a positive effect on emissions, as they directly represent the impact of human behavior and productive activity on the environment.

Descriptive statistics

This section presents the descriptive statistics for the key variables of this study, broken down by Mexico and Ecuador. This comparison is crucial, as it allows us to identify disparities in the scale of economic and demographic activities, and environmental impact between the two nations.

As shown in Table 2, similarities are identified in the structure of the analyzed variables, but differences in the magnitude of CO_2 emissions between the two countries were also noted. On the one hand, the minimum value in Mexico reached approximately 2.13 million tons, while the maximum in Ecuador barely reached

y 24 provincias en Ecuador). Las variables consideradas se describen en el Cuadro 1.

Se espera que el PIB, al representar una medida del crecimiento económico, ejerza un efecto positivo sobre las emisiones de CO_2, particularmente en contextos donde el desarrollo está fuertemente vinculado a sectores industriales, manufactura intensiva, transporte motorizado o generación energética basada en combustibles fósiles (Grossman & Krueger, 1995). Esta relación puede ser aún más marcada en regiones que carecen de regulaciones ambientales estrictas o donde las políticas de mitigación son débiles o inexistentes. En este sentido, un mayor PIB puede reflejar mayor actividad económica pero también un aumento proporcional en la demanda energética, con implicaciones directas sobre los niveles de contaminación (Dinda, 2004).

Por su parte, la población total, medida en su forma logarítmica, se considera una "proxy demográfica" de presión ambiental. El crecimiento poblacional implica mayor concentración urbana, expansión territorial, y mayor generación de residuos, lo cual está asociado generalmente con el aumento de emisiones de CO_2. En el mismo sentido, el volumen de aguas residuales generadas se interpreta como una variable indicadora de carga ambiental, ya que refleja tanto el consumo hídrico como el tratamiento insuficiente de contami-

Table 2. Descriptive statistics of the variables by country.
Cuadro 2. Estadísticos descriptivos de las variables por país.

Variable	Country / País	Mean / Media	Minimum / Mínimo	Maximum / Máximo
CO_2 Emissions / Emisiones de CO_2	Mexico	10,444,736.66	2,133,214.23	32,056,888.05
GDP / PIB	Mexico	740,956.26	147,603.93	3,719,364.52
Population / Población	Mexico	3,937,938.25	731,391.00	16,992,418.00
Wastewater / Agua residual	Mexico	7,159.41	1,549.00	20,837.00
CO_2 Emissions / Emisiones CO_2	Ecuador	6,767.29	0.00	45,805.00
GDP / PIB	Ecuador	4,246,933.60	254,823.89	26,558,266.92
Population / Población	Ecuador	711,578.46	28,205.00	4,410,700.00
Wastewater / Agua residual	Ecuador	0.29	0.02	0.61

Source: Authors' self-made based on MAE, INEC, BAE, INEGI and CONAGUA data, processed with Python.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de MAE, INEC, BAE, INEGI y CONAGUA, procesados mediante Python.

45,805 tons, highlighting the differences in the scale of the recorded values.

The wastewater variable shows that in Mexico there is an average of 7,159.41 units, compared to only 0.29 in Ecuador. This discrepancy suggests that there are disparities in the observed levels. Similarly, the average GDP reported for Ecuador is 2.24 million, which is numerically higher than that of Mexico (740,000). However, it is important to interpret this difference in relation to the currency unit used: Ecuador reports in US dollars (USD), while Mexico reports in Mexican pesos (MXN).

These descriptive results allow us to put the characteristics of the analyzed units into perspective, which contributes to a better understanding of the results obtained in the model, as well as variations between Mexico and Ecuador that are relevant for the interpretation of the spatial analysis.

Results and analysis

The main results obtained from the spatial error model (SEM) estimation are presented and analyzed. The analysis focuses on examining, on the one hand, the relationship between economic, demographic, and environmental variables with respect to CO_2 emissions, and on the other, to identify empirical findings with theoretical expectations presented in the literature, particularly within the framework of the Environmental Kuznets Curve (EKC). With the purpose of facilitating

nantes. Por lo tanto, ambas variables se anticipan con un efecto positivo sobre las emisiones, al representar directamente el impacto del comportamiento humano y productivo sobre el medio ambiente.

Estadísticos descriptivos

En este apartado se presentan los estadísticos descriptivos de las variables fundamentales del estudio, desglosados para México y Ecuador. Este comparativo es crucial, ya que permite identificar las disparidades en la magnitud de las actividades económicas, demográficas y el impacto ambiental entre ambas naciones.

Tal como se muestra en el Cuadro 2, se identifican similitudes en la estructura de las variables analizadas, pero también se notan diferencias en la magnitud de las emisiones de CO_2 entre los dos países. Por un lado, el valor mínimo en Mexico llega aproximadamente a 2.13 millones de ton, mientras que el máximo en Ecuador apenas alcanza las 45,805 ton, lo que pone de manifiesto las diferencias en la escala de los valores registrados.

La variable agua residual muestra que en México hay un promedio de 7,159.41 unidades, en comparación con solo 0.29 en Ecuador. Esta discrepancia sugiere que existen disparidades en los niveles observados. De manera similar, el PIB promedio reportado para ecuador es de 2.24 millones es numéricamente más alto que el de México (740 mil). Sin embargo, es importante interpretar esta diferencia como relación con la unidad monetaria

this comparison, a synthesis matrix of results is included, showing the sign and relative magnitude of the estimated coefficients.

As shown in Table 3, the results are consistent with the theory. The GDP coefficient is negative and statistically significant ($P < 0.05$), which could be considered an indication of a possible transition to lower levels of emissions intensity, in line with the next low phase of the EKC, although without conclusive evidence of an inflection point. On the other hand, the logarithm of the population exhibits a positive and significant effect ($P < 0.01$), confirming the role of population pressure as a determinant in the increase in emissions. Likewise, the wastewater variable shows a positive and significant effect ($P < 0.05$), which is interpreted as reflecting limitations in environmental management infrastructure. Finally, the spatial parameter λ is negative and significant ($P < 0.01$), demonstrating the presence of spatial dependence in emissions and reinforcing the suitability of the SEM model for the analysis.

The estimation of the spatial error model (SEM) using the maximum likelihood method showed an adequate fit, with a pseudo R^2 value of 0.5206, indicating that the model has moderate explanatory power regarding CO_2 emissions (Table 4). The presence of multicollinearity was ruled out, as all variance inflation factors (VIF) were less than two (Figure 1), which supports the validity of the estimates.

utilizadas: Ecuador reporta en dólares (USD) mientras que en México lo hace en pesos (MXN).

Estos resultados descriptivos permiten poner en perspectiva las características de las unidades analizadas, lo que contribuye a una mejor comprensión de los resultados obtenidos en el modelo, Así como variaciones entre México y Ecuador que resultan relevantes para la interpretación del análisis espacial.

Resultados y análisis

Se presentan y analizan los principales resultados obtenidos a partir de la estimación del modelo de error espacial (SEM). El análisis se enfoca a examinar, por una parte, la relación que existe entre las variables económicas, demográficas y ambientales respecto a las emisiones de CO_2, por otro lado, encontrar hallazgos empíricos con las expectativas teóricas planteadas en la literatura particularmente en el marco de la Curva Ambiental de Kuznets (CAK). Con el propósito de facilitar esta comparación se incorpora una matriz de síntesis de resultados en términos de signo y magnitud relativa de los coeficientes estimados.

Como se observa en el Cuadro 3, los resultados resultan coincidentes con la teoría. El coeficiente del PIB es negativo y estadísticamente significativo ($P < 0.05$), lo que podría considerarse indicios de una eventual transición

Table 3. Contrast between empirical findings and theoretical expectations.
Cuadro 3. Contraste entre hallazgos empíricos y expectativas teóricas.

Variable	Expected sign (EKC) / Signo esperado (CAK)	Empirical result / Resultado empírico	Interpretation / Interpretación
GDP / PIB	Positive or inverted U shaped / Positivo o en forma U invertida	Negative* / Negativo*	Indices of transition toward lower pollution levels / Indicios de transición hacia menor intensidad contaminante
Logarithm of population / Logaritmo de la población	Positive / Positivo	Positive*** / Positivo***	Population pressure intensifies pollution / La presión demográfica intensifica la contaminación
Wastewater / Agua residual	Positive / Positivo	Positive* / Positivo*	It reflects limitations in environmental management infrastructure / Refleja limitaciones en infraestructura de gestión ambiental
λ (Spacial effect) / λ (efecto espacial)	Negative / Negativo	Negative** / Negativo**	Demonstrates spatial dependence and validates the SEM model / Evidencia dependencia espacial y valida el modelo SEM

Source: Authors' self-made based on results estimated in Python data (2025).
Fuente: Elaboración propia con base en los resultados estimados en Python (2025).

Table 4. SEM model results.
Cuadro 4. Resultados del modelo SEM.

GDP: / PIB:	**β= -1,631,128.25**	***p* = 0.02759 ***
Log (Population): / Log (Población):	β= 4,113,209.51	*p* = 0.00000 ***
Wastewater: / Agua Residual:	β= 2,268,760.97	*P* = 0.01083 *
λ:	β= -0.144	*P* = 0.00912 **

Source: Authors' self-made based on results estimated in Python data (2025).
Fuente: Elaboración propia con base en los resultados estimados en Python (2025).

Figure 1. Variance inflation factors (VIF) by variable.
Figura 1. Factores de inflación de la varianza (VIF) por variable.

	feature	VIF
0	const	1.000000
1	GDP = PIB	1.215332
2	log_Población / log_Poblacion	1.848352
3	Wastewater / AguaResidual	1.927062

Source: Authors' self-made based on results estimated in Python data (2025). Image exported from Jupyter Notebook.
Fuente: Elaboración propia con base en los resultados estimados en Python (2025). Imagen exportada desde Jupyter Notebook.

The econometric results indicate that the GDP coefficient was negative and significant (β = -1,631,128.25; *p* = 0.02759), which may reflect a possible transition toward a stage of lower pollution intensity in regions with higher levels of economic development. This pattern could be consistent with the downward phase of the Environmental Kuznets Curve.

However, the logarithmic variables of population (β = 4,113,209.51; *p* < 0.0000) and wastewater β = 2,268,760.97; *p* = 0.01083) showed positive signs and high significance, confirming their role as sources of environmental pressure. These findings suggest that a higher population and increased wastewater generation are associated with higher levels of pollutant emissions, consistent with previous literature. The spatial autocorrelation parameter λ (β = -0.144; *p* = 0.00912) was negative and significant, indicating that there are spatial patterns in the residuals not explained by the included variables. This result validates the choice of the SEM model, as it confirms that emissions tend to cluster spatially among neighboring regions.

Finally, the data corresponds to the set of entities analyzed in both countries, allowing for the identification of common patterns in the relationship between the variables considered. Despite the structural differences described in the study area, significant similarities are observed, particularly regarding the positive effect of

hacia niveles más bajos de intensidad de emisiones, en línea con la siguiente fase baja de la CAK, aunque sin evidencia concluyente de un punto de inflexión. Por otro lado, el logaritmo de la población exhibe un efecto positivo y significativo (*P* < 0.01), confirmando el papel de la presión demográfica como un determinante en el aumento de las emisiones. Así como la variable agua residual presenta un efecto positivo y significativo (*P* < 0.05), lo que se interpreta como un reflejo de las limitaciones en la infraestructura de gestión ambiental. Por último, el parámetro espacial λ resulta negativo y significativo (*P* < 0.01), lo que evidencia la presencia de dependencia espacial en las emisiones y consolida la adecuación del modelo SEM para el análisis.

La estimación del modelo de error espacial (SEM), mediante el método de máxima verosimilitud, mostró un ajuste adecuado, con un valor de pseudo R^2 de 0.5206, lo que indica una capacidad explicativa moderada del modelo sobre las emisiones de CO_2 (Cuadro 4). La presencia de multicolinealidad fue descartada, ya que todos los factores de inflación de la varianza (VIF) resultaron inferiores a dos (Figura 1), lo cual respalda la validez de las estimaciones.

Los resultados econométricos indican que el coeficiente del PIB fue negativo y significativo (β = -1,631,128.25; *p* = 0.02759), lo cual puede reflejar una posible transición hacia una etapa de menor intensidad contaminante en

population and wastewater on CO_2 emissions, suggesting that environmental pressures related to population growth and resource management are significant in both contexts. Furthermore, the relevance of the spatial component indicates that in both countries emissions are not independent between regions but rather exhibit interconnected territorial dynamics.

Results analysis

The results of this research show that both population size and wastewater generation are positively linked to emission levels, which suggests that environmental pressure stems not only from economic growth but also from demographic trends and institutional capacity to manage the environment. This finding reinforces the idea that environmental degradation is a complex phenomenon requiring the simultaneous consideration of structural, social, and territorial aspects. Furthermore, it highlights that variables traditionally considered secondary (such as access to sanitation services or population density) can play a central role in shaping emission trajectories.

GDP showed a marginally significant negative coefficient, which, although not conclusive, could be interpreted as a sign that some regions are beginning to shift towards less polluting economic activities, possibly due to the adoption of cleaner technologies, energy efficiency, or greater environmental awareness. This finding is indirectly linked to the EKC hypothesis, which posits that, beyond a certain threshold of economic development, emissions tend to decrease. While this result does not allow us to affirm the existence of a clear inflection point, it does suggest that in some territories a process of decoupling between growth and environmental pressure may be beginning.

The inclusion of the spatial autocorrelation parameter (λ) and its significance validated the use of the SEM model, demonstrating that emissions in one region are related to conditions in neighboring areas. This finding is relevant from both a methodological and public policy perspective, as it reinforces the need to design territorially coordinated mitigation strategies. Environmental policies should not be formulated in isolation, but rather by considering the interactions between entities, particularly with regard to pollution flows, population mobility, shared infrastructure, and water resources.

The usefulness of the subnational and comparative approach adopted in this research lay in its ability to capture divergent patterns of behavior among regions in both countries. While in Mexico greater heterogeneity was observed among states with contrasting economic

regiones con mayor desarrollo económico. Este patrón podría ser consistente con la fase descendente de la Curva Ambiental de Kuznets.

Sin embargo, las variables logaritmo de la población ($\beta = 4{,}113{,}209.51$; $p < 0.0000$) y agua residual ($\beta = 2{,}268{,}760.97$; $p = 0.01083$) presentaron signos positivos y alta significancia, lo que confirma su papel como fuentes de presión ambiental. Estos hallazgos sugieren que un mayor volumen poblacional y un incremento en la generación de aguas residuales están asociados a mayores niveles de emisiones contaminantes, en línea con la literatura previa. El parámetro de autocorrelación espacial λ ($\beta = -0.144$; $p = 0.00912$) fue negativo y significativo lo que indica que existen patrones espaciales en los residuos no explicados por las variables incluidas. Este resultado valida la elección del modelo SEM, ya que confirma que las emisiones tienden a agruparse espacialmente entre regiones vecinas.

Por último, los datos corresponden al conjunto de entidades analizadas en ambos países, lo que permite identificar patrones comunes en la relación entre las variables consideradas. A pesar de las diferencias estructurales descritas en el área de estudio, se observan similitudes relevantes, en especial en el efecto positivo de la población y aguas residuales sobre las emisiones de CO_2, lo que sugiere que las presiones ambientales relacionadas con el crecimiento demográfico y la gestión de recursos son bastantes en ambos contextos. Además, la relevancia del componente espacial indica que en ambos países las emisiones no son independientes entre regiones si no que muestran dinámicas territoriales de interconexión.

Análisis de resultados

Los resultados de esta investigación muestran que tanto el tamaño de la población, como la generación de aguas residuales están positivamente vinculados con los niveles de emisiones, lo que sugiere que la presión ambiental no solo proviene del crecimiento económico, sino también del comportamiento demográfico y de la capacidad institucional para gestionar el medio ambiente. Este hallazgo refuerza la idea de que el deterioro ambiental es un fenómeno complejo, que exige abordar simultáneamente aspectos estructurales, sociales y territoriales. Asimismo, pone de manifiesto que variables tradicionalmente consideradas secundarias (como el acceso a servicios de saneamiento o la densidad poblacional) pueden desempeñar un papel central en la configuración de las trayectorias de emisiones.

El PIB mostró un coeficiente negativo marginalmente significativo, lo que, aunque no concluyente, podría interpretarse como una señal de que algunas regiones

structures, in Ecuador emissions were strongly influenced by the concentration of extractive activities in certain provinces. This distinction provides empirical evidence for the arguments developed in the theoretical framework, which highlight the importance of incorporating contextual, territorial, and institutional variables to adequately assess the validity or limitations of EKC in Latin America.

Another noteworthy contribution was the incorporation of variables related to environmental management (wastewater), usually absent in models focused exclusively on GDP. The inclusion of this variable made it possible to assess, at least indirectly, the institutional capacity to reduce the impacts of economic development. In this sense, a promising line of research opens up regarding the need to strengthen environmental monitoring systems and expand the coverage of essential public services such as sanitation, especially in rural areas or those with less fiscal capacity. Experiences such as those reported by Suárez-Venero (2019) demonstrate that agroforestry systems, in addition to functioning as a productive sector, contribute to carbon storage and offer sustainable alternatives for mitigating emissions in rural contexts.

Although the estimated model was developed jointly for both countries, certain differences in the behavior of the variables can be observed. In the case of Mexico, the relationship between the analyzed variables and emissions appears to be influenced by greater diversity in the productive structure and the level of urbanization in the different states. On the other hand, in Ecuador, the results may be more closely related to the concentration of economic activities in certain provinces. These differences do not alter the general pattern found, but they do highlight the importance of considering territorial particularities when interpreting the results.

This study demonstrated that incorporating spatial models not only improves the quality of statistical estimation, but also allows for a more accurate representation of the environmental and economic realities of developing countries. The use of a common design for Mexico and Ecuador enabled useful comparisons that strengthen the explanatory power of the results, while also highlighting the need to conduct more systematic and long-term regional analyses.

Discussion

This research analyzes two Latin American countries: Mexico and Ecuador, which represent relevant examples for exploring how economic, institutional, political, and environmental trajectories influence CO_2 emissions.

están comenzando a moverse hacia actividades económicas menos contaminantes, posiblemente gracias a la adopción de tecnologías más limpias, la eficiencia energética o una mayor conciencia ambiental. Este resultado se vincula de manera indirecta con la hipótesis de la CAK, la cual plantea que, a partir de cierto umbral de desarrollo económico, las emisiones tienden a disminuir. Si bien este resultado no permite afirmar la existencia de un punto de inflexión claro, sí sugiere que en algunos territorios podría estar iniciando un proceso de desacoplamiento entre crecimiento y presión ambiental.

La inclusión del parámetro de autocorrelación espacial (λ) y su significancia validaron el uso del modelo SEM, al demostrar que las emisiones en una región están relacionadas con las condiciones de regiones vecinas. Este hallazgo es relevante tanto desde el punto de vista metodológico como de política pública, ya que refuerza la necesidad de diseñar estrategias de mitigación coordinadas territorialmente. Las políticas ambientales no deben formularse como islas administrativas, sino tomando en cuenta las interacciones entre entidades, particularmente en lo que respecta a flujos de contaminación, movilidad de población, infraestructura compartida y recursos hídricos.

La utilidad del enfoque subnacional y comparativo adoptado en esta investigación radicó en su capacidad para captar patrones divergentes de comportamiento entre las regiones de ambos países. Mientras que en México se observó una mayor heterogeneidad entre entidades con estructuras económicas contrastantes, en Ecuador las emisiones estuvieron fuertemente condicionadas por la concentración de actividades extractivas en determinadas provincias. Esta diferenciación aporta evidencia empírica a los argumentos desarrollados en el marco teórico, que señalan la importancia de incorporar variables contextuales, territoriales e institucionales para evaluar adecuadamente la validez o limitaciones de la CAK en América Latina.

Otra contribución destacable fue la incorporación de variables relacionadas con la gestión ambiental (aguas residuales), usualmente ausentes en modelos centrados exclusivamente en el PIB. La inclusión de esta variable permitió evaluar, al menos de manera indirecta, la capacidad institucional para reducir los impactos del desarrollo económico. En este sentido, se abre una línea de investigación prometedora sobre la necesidad de fortalecer los sistemas de monitoreo ambiental y ampliar la cobertura de servicios públicos esenciales como el saneamiento, especialmente en zonas rurales o con menor capacidad fiscal. Experiencias como las reportadas por Suárez-Venero (2019) demuestran que los sistemas agroforestales, además de funcionar como

This is especially relevant in the context of developing countries that face multiple barriers to sustainable development.

The selection of subnational units allowed us to overcome the limitations of aggregate analyses. A total of 56 entities were analyzed (32 states in Mexico and 24 provinces in Ecuador). This choice made it possible to capture the internal territorial heterogeneity of both countries, observing not only national differences but also the regional dynamics that shape the relationship between economic growth, demographic pressure, and CO_2 emissions.

The inclusion of a territorial and comparative perspective proved essential for understanding how economic, demographic, and environmental variables interact within different institutional frameworks (Cansino et al., 2019). It also allowed for progress in the study of the Environmental Kuznets Curve (EKC) in specific Latin American contexts, where structural inequality and ecological diversity call for a more disaggregated and contextualized approach.

Additionally, a map based on annual CO_2 emissions by entity was incorporated, allowing visualization of the spatial distribution of this variable across the analyzed regions. This input offers an initial approach to territorial patterns of environmental pressure and reinforces the need to apply a methodological approach that considers the spatial dimension (Mahmood, 2023).

As can be seen in Figure 2, there are marked differences in the intensity of emissions among regions. In the case of Mexico, the states with the highest volume of emissions generally correspond to more industrialized and urbanized areas, whereas in Ecuador, specific concentrations associated with provinces engaged in extractive activities are identified. These initial observations support the subsequent analysis using spatial econometric techniques.

The results obtained using the spatial error model (SEM) confirm that the behavior of carbon dioxide (CO_2) emissions in Mexico and Ecuador cannot be explained solely by conventional economic logic. Although GDP showed a negative and marginally significant coefficient, suggesting a possible shift toward less polluting activities, however, this result alone is not enough to empirically validate the environmental Kuznets curve (EKC) hypothesis. On the contrary, the robust and positive influence of the variables: population logarithm and wastewater volume indicates that demographic and infrastructure factors have a considerable impact on shaping the environmental trajectories of both countries, consistent with evidence on the role of land use in environmental

sector productivo, contribuyen al almacenamiento de carbono y ofrecen alternativas sustentables para mitigar emisiones en contextos rurales.

Aunque el modelo estimado se desarrolló de una manera conjunta para ambos países, se pueden notar ciertas diferencias en el comportamiento de las variables. En el caso de México, la relación entre las variables analizadas y las emisiones parece estar influenciada por una mayor diversidad en la estructura productiva y el nivel de urbanización en las distintas entidades, Por otro lado, en Ecuador, los resultados podrían estar más relacionados con la concentración de actividades económicas en ciertas provincias. Estas diferencias no alteran el patrón general que se ha encontrado, pero si resalta la importancia de tener en cuenta las particularidades territoriales al interpretar los resultados.

Este trabajo demostró que la incorporación de modelos espaciales no solo mejora la calidad de la estimación estadística, sino que, también permite representar con mayor fidelidad la realidad ambiental y económica de los países en desarrollo. El uso de un diseño común para México y Ecuador permitió realizar comparaciones útiles que fortalecen el valor explicativo de los resultados, al tiempo que ponen de manifiesto la necesidad de llevar a cabo análisis regionales más sistemáticos y a largo plazo.

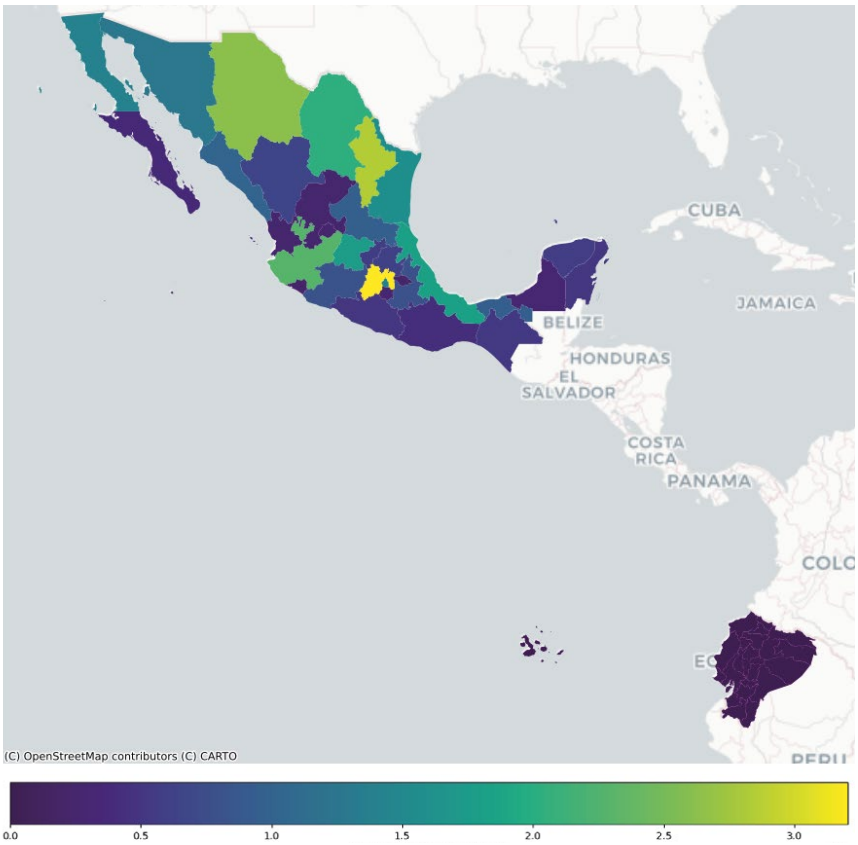
Discusión

Esta investigación analiza dos países de América Latina: México y Ecuador, que representan ejemplos pertinentes para explorar cómo las trayectorias económicas, institucionales, políticas y ambientales influyen sobre las emisiones de CO_2. En especial, en contextos de países en vías de desarrollo donde se enfrentan múltiples barreras hacia un desarrollo sostenible.

La selección de unidades subnacionales permitió superar las limitaciones de los análisis agregados. Se analizaron un total de 56 entidades (32 entidades federativas en México y 24 provincias en Ecuador). Esta elección posibilitó capturar la heterogeneidad territorial interna de ambos países, observando no solo las diferencias nacionales, sino también las dinámicas regionales que condicionan la relación entre crecimiento económico, presión demográfica y emisiones de CO_2.

La inclusión de una perspectiva territorial y comparada resultó esencial para entender cómo las variables económicas, demográficas y ambientales interactúan bajo marcos institucionales diferentes (Cansino et al., 2019). Asimismo, permitió avanzar en el estudio de la Curva Ambiental de Kuznets (CAK) en contextos específicos de América Latina, donde la desigualdad estructural y la

Figure 2. Territorial distribution of CO_2 emissions in Mexico and Ecuador in 2020.
Figura 2. Distribución territorial de las emisiones de CO_2 en México y Ecuador en 2020.



Source: Authors' self-made based on Ministerio del Ambiente de Ecuador (MAE) and the Pollutant Release and Transfer Register (PRTR) in Mexico data. Emissions are expressed in annual tons of CO_2 per subnational entity.
Fuente: Elaboración propia con datos del Ministerio del Ambiente de Ecuador (MAE) y el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC) en México. Las emisiones están expresadas en toneladas anuales de CO_2 por entidad subnacional.

pressure, where studies such as that by López-Teloxa et al. (2020) highlight that agricultural soils in the Mexican tropics exhibit variations in organic carbon associated with management practices, which impacts the balance of CO_2 emissions.

When comparing these results with the previously developed theoretical framework, it is evident that the observed dynamics partially coincide with studies pointing to the empirical weakness of the EKC in Latin America. For example, Freire-Noriega (2021), in his analysis for Ecuador, does not find evidence of an inverted U-shaped relationship between GDP and emissions, which aligns with the limited magnitude of the GDP coefficient found in this study. Similarly, a previous study by Herrera-Ríos & Terán-Pérez (2024) also confirms this pattern by showing that economic growth in Mexico remains associated with increased emissions, although with certain indications of decoupling in the most de-

diversidad ecológica hacen necesario un enfoque más desagregado y contextualizado.

Asimismo, se incorporó un mapa con base en las emisiones anuales de CO_2 por entidad, el cual permite visualizar la distribución espacial de esta variable en las regiones analizadas. Este insumo ofrece un primer acercamiento a los patrones territoriales de presión ambiental y refuerza la necesidad de aplicar un enfoque metodológico que contemple la dimensión espacial (Mahmood, 2023).

Como puede observarse en la Figura 2, existen marcadas diferencias en la intensidad de las emisiones entre regiones. En el caso mexicano, las entidades con mayor volumen de emisiones corresponden en general a zonas más industrializadas y urbanizadas, mientras que en Ecuador se identifican concentraciones específicas asociadas a provincias con actividad extractiva. Estas

veloped regions. This result coincides with the findings of Juárez (2024), who documents that this relationship has not yet reached its tipping point but is beginning to show signs of progressive transformation.

This pattern is particularly relevant given that GDP reveals structural differences across the 56 regions analyzed in this study. In Mexican states and Ecuadorian provinces where agriculture or tourism predominates, the environmental impact per unit of GDP could be lower than in areas with a high concentration of heavy industry or electricity generation based on fossil fuels. In this sense, the results of this study confirm the warning issued by López-Menéndez et al. (2006) regarding the interpretive limitations of Kuznets' original approach when applied to the relationship between growth and pollution. Similarly, in the case of Chile, Castillo-Acevedo (2024) documents that the relationship between economic growth and air pollution shows significant variations among regions, reinforcing the need to consider disaggregated approaches to assess the validity of the EKC.

In contrast, demographic and environmental management variables showed statistically significant coefficients with expected signs. The logarithm of the population showed a very high and highly significant coefficient ($p < 0.01$) **, suggesting that pressures associated with population density—such as urban mobility, energy demand, resource consumption, and waste generation—are key determinants of emissions behavior. This finding is coherent with the results of Flores-Xolocotzi (2023), who identifies an inverted U-shaped relationship between population density and green areas, as well as with Mosconi et al. (2020), who argue that the links between the economy and the environment should be understood as complex territorial processes.

Likewise, the variable of wastewater generated, as a *proxy* for institutional capacity to manage the impacts of development, also showed a significant positive relationship ($p < 0.05$) with emissions. This reinforces the importance of considering infrastructure and basic services indicators in environmental models. In contexts such as Ecuador, where wastewater treatment rates are low in several provinces, the correlation between this indicator and emissions becomes even more relevant for evaluating environmental performance. Meanwhile, in Mexico, regional gaps in access to sanitation could also explain part of the observed variance. Previous studies using Ridge regression models with cross-validation (Ridge CV) applied to the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) confirm the relevance of precipitation and economic activity to vegetation health, demonstrating that the analysis of different

observaciones iniciales respaldan el análisis posterior mediante técnicas de econometría espacial.

Los resultados obtenidos mediante el modelo de error espacial (SEM) confirman que el comportamiento de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) en México y Ecuador no puede explicarse únicamente desde la lógica económica convencional. Aunque el PIB presentó un coeficiente negativo y marginalmente significativo, lo que sugiere una posible transición hacia actividades menos contaminantes, este resultado no es suficiente por sí solo para validar empíricamente la hipótesis de la curva ambiental de Kuznets (CAK). Por el contrario, la influencia robusta y positiva de las variables: logaritmo de la población y volumen de aguas residuales indica que los factores demográficos y de infraestructura tienen un peso considerable en la configuración de las trayectorias ambientales de ambos países, coincidiendo con la evidencia sobre el papel del uso de suelo en la presión ambiental, donde trabajos como el de López-Teloxa et al. (2020) destacan que los suelos agrícolas en el trópico mexicano presentan variaciones en el carbono orgánico asociados a prácticas de manejo, lo que repercute en el balance de las emisiones de CO_2.

Al contrastar estos resultados con el marco teórico previamente desarrollado, es evidente que las dinámicas observadas coinciden en parte con los estudios que señalan la debilidad empírica de la CAK en América Latina. Por ejemplo, Freire-Noriega (2021), en su análisis para Ecuador, no encuentra evidencia de una relación en forma de U invertida entre PIB y emisiones, lo cual coincide con la magnitud limitada del coeficiente del PIB encontrado en este estudio. De forma similar, un estudio previo realizado por Herrera-Ríos &Terán-Pérez (2024) también confirma este patrón, al mostrar que el crecimiento económico en México sigue asociado a un aumento en las emisiones, aunque con ciertos indicios de desacoplamiento en las regiones más desarrolladas. Dicho resultado coincide con lo planteado por Juárez (2024), quien documenta que esta relación aún no ha alcanzado su punto de inflexión, pero comienza a mostrar señales de transformación progresiva.

Este patrón es particularmente relevante si se considera que el PIB identificar diferencias estructurales en las 56 regiones analizadas en este estudio. En las entidades de México y provincias de Ecuador donde predomina la actividad agrícola o el turismo, el impacto ambiental por unidad de PIB podría ser menor que en zonas con alta presencia de industrias pesadas o generación eléctrica basada en combustibles fósiles. En este sentido, los resultados del presente estudio confirman la advertencia de López-Menéndez et al. (2006) sobre los límites interpretativos del enfoque original de Kuznets cuando se aplica a la relación entre crecimiento y contaminación.

environmental and socioeconomic factors is essential for understanding sustainability issues (Herrera-Ríos & Soto-Zazueta, 2024).

The value of the spatial autocorrelation parameter (λ =-0.14421; $p < 0.01$), indicates the presence of a spatial dependence between CO_2 emissions in one region and those occurring in neighboring areas. This result theoretically validates the adopted methodological approach, in line with studies such as those by Xu et al. (2018) for China and Mosconi et al. (2020) for Europe, which highlight how pollution is not randomly or strictly localized, but rather responds to interdependent regional dynamics. In the case of Latin America, this evidence is even more significant given the institutional fragmentation, asymmetries in public policies, and the lack of regional mechanisms for environmental cooperation. Freire-Vinueza, Meneses&Cuesta (2021) even describe the region as a "paradise of environmental pollution", highlighting that institutional weakness and tolerance towards intensive extractive sectors aggravate environmental governance problems.

From a comparative perspective, the fact that the model has integrated subnational data from both Mexico and Ecuador offers a significant advantage over previous studies that are restricted to a single country. As Riveros-Gavilanes & Reyes-Vargas (2023) point out, economic and environmental behavior patterns are heterogeneous within the region and require models that capture this diversity. This comparative analysis allows us to identify similarities—such as the central role of population—but also institutional differences that could explain why, in some cases, GDP has a more attenuated or even negative effect on emissions.

It is important to note that environmental governance and institutional capacity, although not directly modeled in this empirical version, underlie the variables used. Wastewater volume, for example, reflects not only consumption habits but also the capacity of public institutions to provide treatment services, environmental monitoring, and civic education. This point has been widely discussed in studies such as those by Hussain et al. (2023) and Wang et al. (2022), who find that the quality of governance is a key predictor of *per capita* emissions.

Most studies of EKC in the Americas use linear models, such as OLS, VAR, or panel data, this study, however, contributes to the methodological debate by employing a SEM model, which allows for the capture of spatial residual relationships and provides more accurate estimates. This is particularly relevant in countries such as Mexico and Ecuador, where territorial diversity is high

De forma similar, en el caso chileno, Castillo-Acevedo (2024) documenta que la relación entre crecimiento económico y contaminación atmosférica presenta variaciones significativas entre regiones, lo que refuerza la necesidad de considerar enfoques desagregados para evaluar la validez de la CAK.

En cambio, las variables demográficas y de gestión ambiental presentaron coeficientes estadísticamente significativos y con signos esperados. El logaritmo de la población mostró un coeficiente muy elevado y altamente significativo ($p < 0.01$) **, lo que sugiere que las presiones asociadas a la densidad poblacional —como la movilidad urbana, la demanda energética, el consumo de recursos y la generación de residuos— son elementos determinantes en el comportamiento de las emisiones. Este hallazgo es coherente con los resultados de Flores-Xolocotzi (2023), quien identifica una relación de tipo U invertida entre densidad poblacional y áreas verdes, así como con Mosconi et al. (2020), quienes argumentan que los vínculos entre economía y medio ambiente deben ser comprendidos como procesos territoriales complejos.

Asimismo, la variable de aguas residuales generadas, como *proxy* de la capacidad institucional para gestionar los impactos del desarrollo, mostró también una relación positiva significativa ($p < 0.05$) con las emisiones. Esto refuerza la importancia de considerar indicadores de infraestructura y servicios básicos en los modelos ambientales. En contextos como el ecuatoriano, donde las tasas de tratamiento de aguas residuales son bajas en varias provincias, la correlación entre este indicador y las emisiones se vuelve aún más relevante para evaluar el desempeño ambiental. Por su parte, en México, las brechas regionales en acceso al saneamiento también podrían explicar parte de la varianza observada. Estudios previos que emplean modelos de regresión Ridge con validación cruzada (Ridge CV) aplicados al Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) confirman la relevancia de la precipitación y la actividad económica en la salud de la vegetación, demostrando que el análisis de distintos factores ambientales y socioeconómicos resulta esencial para comprender los temas de sostenibilidad (Herrera-Ríos & Soto-Zazueta, 2024).

El valor del parámetro de autocorrelación espacial (λ =-0.14421; $p < 0.01$), indica la presencia de la dependencia espacial entre las emisiones de CO_2 en una entidad están parcialmente determinadas, por lo que ocurre en las regiones vecinas. Este resultado valida teóricamente el enfoque metodológico adoptado, en línea con estudios como los de Xu et al. (2018) para China y Mosconi et al. (2020) para Europa, que resaltan cómo la contaminación no se distribuye de manera

and environmental dynamics do not easily conform to homogeneous national patterns. Therefore, the results obtained should be interpreted not as direct validations of the EKC, but rather as evidence that this hypothesis can take different forms depending on the institutional, territorial, and demographic context. Mishra (2020) agrees that the relationship between economic growth and environmental sustainability must be analyzed through nonlinear and multilateral approaches that incorporate indicators of governance, wellbeing, and resilience capacity to reflect the complexity of development in emerging economies. These findings have concrete implications for public policy design.

The results obtained show consistent patterns with the most recent environmental literature and underscore the importance of taking into account both structural factors and spatial dynamics when analyzing pollutant emissions. The significant influence of demographic and environmental management variables, along with evidence of spatial dependence in waste, reinforces the need to use econometric tools that recognize territorial diversity. These findings not only validate the explanatory power of the SEM model in comparative contexts such as those of Mexico and Ecuador but also open the door to exploration of institutional and public policy differences as additional factors that may influence emissions variation.

Conclusions

This article confirms the need to implement differentiated policies tailored to the structural conditions of each state or province, rather than relying on a national average assessment. Second, it underscores the urgency of strengthening environmental management infrastructure, particularly regarding sanitation and water treatment. Third, it suggests that without improvements in urban planning and territorial governance, the benefits of economic growth could continue to be accompanied by negative environmental impacts, which would jeopardize the sustainability of development.

From this perspective, the present study not only provides empirical evidence that enriches the debate on the validity of the EKC in Latin America, but also contributes methodologically by demonstrating the usefulness of incorporating spatial and comparative approaches. For future research, it is recommended to include explicit institutional indicators, such as quality of governance, corruption, and regulatory capacities, as well as to explore nonlinear interactions among variables, which would allow for the identification of critical thresholds and potential inflection points in the relationship between development and sustainability.

aleatoria ni estrictamente local, sino que responde a dinámicas regionales interdependientes. En el caso de América Latina, esta evidencia es aún más importante dada la fragmentación institucional, las asimetrías en políticas públicas y la falta de mecanismos regionales de cooperación ambiental. Freire-Vinueza, Meneses & Cuesta (2021) califican incluso a la región como un "paraíso de la contaminación ambiental", destacando que la debilidad institucional y la tolerancia hacia sectores extractivos intensivos agravan los problemas de gobernanza ambiental.

Desde una perspectiva comparada, el hecho de que el modelo haya integrado datos subnacionales tanto de México como de Ecuador ofrece una ventaja significativa respecto a estudios previos que se restringen a un solo país. Como señala Riveros-Gavilanes & Reyes-Vargas (2023), los patrones de comportamiento económico y ambiental son heterogéneos dentro de la región y requieren de modelos que capten dicha diversidad. Este análisis comparativo permite identificar similitudes —como el papel central de la población— pero también diferencias institucionales que podrían explicar por qué en algunos casos el PIB tiene un efecto más atenuado o incluso negativo sobre las emisiones.

Es importante señalar que la gobernanza ambiental y la capacidad institucional, aunque no fueron modeladas directamente en esta versión empírica, subyacen a las variables utilizadas. El volumen de aguas residuales, por ejemplo, no solo refleja hábitos de consumo, sino también la capacidad de las instituciones públicas para proveer servicios de tratamiento, supervisión ambiental y educación ciudadana. Este punto ha sido ampliamente discutido en estudios como los de Hussain et al. (2023) y Wang et al. (2022), quienes encuentran que la calidad de la gobernanza es un predictor clave de las emisiones *per cápita*.

La mayoría de los estudios de la CAK en América utilizan modelos lineales, como MCO, VAR o datos de panel, este trabajo en cambio aporta al debate metodológico al emplear un modelo SEM, que permite captar las relaciones residuales espaciales y ofrecer estimaciones más precisas. Esto resulta particularmente relevante en países como México y Ecuador, donde la diversidad territorial es alta y las dinámicas ambientales no se ajustan fácilmente a patrones nacionales homogéneos. Por tanto, los resultados obtenidos deben ser interpretados no como validaciones directas de la CAK, sino como evidencia de que dicha hipótesis puede adquirir formas distintas dependiendo del contexto institucional, territorial y demográfico. Mishra (2020) coincide en que la relación entre crecimiento económico y sostenibilidad ambiental debe analizarse a través de enfoques

It is recommended that future research incorporate additional variables, such as institutional quality, forest cover, energy intensity, and educational level. Similarly, it would be pertinent to develop dynamic or panel models that allow for the assessment of the temporal evolution of emissions and the detection of potential inflection points in environmental trajectories. Taken together, these methodological improvements would contribute to generating more robust diagnoses to support sustainable, equitable, and territorially contextualized public policy decisions.

This differentiation provides empirical evidence for the arguments developed in the theoretical framework, which highlight the importance of incorporating contextual, territorial, and institutional variables to adequately assess the validity or limitations of EKC in Latin America.

Based on the results obtained, it is suggested that we move towards differentiated public policies that recognize the structural disparities among states and provinces. A more precise design of environmental instruments would allow us to address the specific causes of emissions in each territory and avoid homogenous solutions that are ineffective or even counterproductive. For example, while in some regions it would be necessary to promote clean technologies for industry, in others it would be more important to expand sanitation infrastructure or implement environmental education programs.

End of English version

References / Referencias

Afifi, A. (2012). *The environmental Kuznets: F1or high, middle, and low-income Latin American countries*. Bryant Digital Repository. https://digitalcommons.bryant.edu/eeb/vol5/iss1/1/

Alvarado, L. A. C., Vinueza, A., y Waldmüller, J. (2024). *Territorio y precarización bajo un contexto de presiones extractivas: El caso de las comunidades Awá Guadualito y La Unión en la provincia de Esmeraldas, Ecuador* [Tesis de maestría]. Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO, Ecuador). https://repositorio.flacsoandes.edu.ec/items/0040e907-3883-48a1-a751-8b5d53e2db8d

Alzate-Rodríguez, L. (2022). *Análisis de la deforestación en Colombia desde la curva ambiental de Kuznets* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia. https://repositorio.unal.edu.co/bitstreams/f9d428db-4de7-46c3-9aee-d369b7d08c8e/download

Anselin, L. (1988). *Spatial econometrics: Methods and models*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/978-94-015-7799-1

no lineales y multilaterales, que incorporen indicadores de gobernanza, bienestar y capacidad de resiliencia para reflejar la complejidad del desarrollo en economías emergentes. Estos hallazgos tienen implicaciones concretas para el diseño de políticas públicas.

Los resultados obtenidos muestran patrones que son coherentes con la literatura ambiental más reciente y subrayan la importancia de tener en cuenta tanto los factores estructurales como las dinámicas espaciales al analizar las emisiones contaminantes. La notable influencia de las variables demográficas y de gestión ambiental, junto con la evidencia de dependencia espacial en los residuos, refuerzan la necesidad de utilizar herramientas econométricas que reconozcan la diversidad territorial. Estos hallazgos no solo validan el valor explicativo del modelo SEM en contextos comparativos como los de México y Ecuador, sino que también abren la puerta a la exploración de diferencias institucionales y de políticas públicas como factores adicionales que pueden influir en la variación de las emisiones.

Conclusiones

El presente artículo confirma la necesidad de aplicar políticas diferenciadas que se adapten a las condiciones estructurales de cada entidad federativa o provincia, en lugar de partir de un diagnóstico nacional promedio. En segundo lugar, refuerza la urgencia de fortalecer la infraestructura de gestión ambiental, especialmente en lo referente al saneamiento y tratamiento de aguas. En tercer lugar, sugieren que, sin una mejora en la planificación urbana y en la gobernanza territorial, los beneficios del crecimiento económico podrían seguir estando acompañados de impactos ambientales negativos, lo que pondría en riesgo la sostenibilidad del desarrollo.

Desde esta perspectiva, el presente estudio no solo aporta evidencia empírica que enriquece el debate sobre la validez de la CAK en América Latina, sino que también contribuye metodológicamente al demostrar la utilidad de incorporar enfoques espaciales y comparativos. De cara a futuras investigaciones, se recomienda incluir indicadores institucionales explícitos, como la calidad de gobierno, la corrupción o las capacidades regulatorias, así como explorar interacciones no lineales entre las variables, lo que permitiría identificar umbrales críticos y posibles puntos de inflexión en la relación entre desarrollo y sostenibilidad.

Se recomienda que futuras investigaciones incorporen variables adicionales, como la calidad institucional, la cobertura forestal, la intensidad energética o el nivel educativo. Del mismo modo, sería pertinente desarrollar modelos dinámicos o de panel que permitan evaluar la evolución temporal de las emisiones y de-

tectar posibles puntos de inflexión en las trayectorias ambientales. En conjunto, estas mejoras metodológicas contribuirían a generar diagnósticos más sólidos para respaldar decisiones de políticas públicas sostenibles, justas y contextualizadas territorialmente.

Esta diferenciación aporta evidencia empírica a los argumentos desarrollados en el marco teórico, que señalan la importancia de incorporar variables contextuales, territoriales e institucionales para evaluar adecuadamente la validez o limitaciones de la CAK en América Latina.

A partir de los resultados obtenidos, se sugiere avanzar hacia políticas públicas diferenciadas que reconozcan las disparidades estructurales entre entidades federativas y provincias. Un diseño más preciso de los instrumentos ambientales permitiría abordar las causas específicas de las emisiones en cada territorio y evitar soluciones homogéneas que resultan ineficaces o incluso contraproducentes. Por ejemplo, mientras que en algunas regiones sería necesario fomentar las tecnologías limpias para la industria, en otras sería más prioritario ampliar la infraestructura de saneamiento o implementar programas de educación ambiental.

Fin de la versión en español

Balza, L. H., Yepez, A., & Matías, D. (2024, 18 de julio). *¿Cómo se relacionan las emisiones CO_2 y el crecimiento económico en América Latina y el Caribe?*. Banco Interamericano de Desarrollo (Blog). https://blogs.iadb.org/energia/es/como-se-relacionan-las-emisiones-co2-y-el-crecimiento-economico-en-america-latina-y-el-caribe/ BID Blog

Cansino, J. M., Román-Collado, R., & Molina, J. C. (2019). Quality of institutions, technological progress, and pollution havens in Latin America: An analysis of the environmental Kuznets curve hypothesis. *Sustainability, 11*(13), 3708. https://doi.org/10.3390/su11133708

Castillo-Acevedo, N. F. (2024). *El efecto de largo plazo del crecimiento económico en la contaminación: Evidencia de la curva medioambiental de Kuznets en Chile* [Tesis de maestría]. Universidad de Chile.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2022). *Panorama del desarrollo territorial de América Latina y el Caribe 2022*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. https://www.cepal.org/es/publicaciones/48119-panorama-desarrollo-territorial-america-latina-caribe-2022 CEPAL

Comisión Económica para América Latina y El Caribe [CEPAL]. (2024*). Biodiversidad y desarrollo: reflexiones desde América Latina y el Caribe* (LC/TS.2024/95). Santiago: CEPAL.

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [OCDE], Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL] & Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe [CAF]. (2022). *Perspectivas económicas de América Latina 2022: Hacia una transición verde y justa*. OCDE Publishing. https://doi.org/10.1787/3d5554fc-en OECD

Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets curve hypothesis: A survey. *Ecological Economics, 49*(4), 431–455. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.02.011

Elenes, J. R. F., Parra, T. A., & Urbano, P. M. (2024). *Industria manufacturera: Cambio estructural, relocalización, avances y rezagos en las regiones de México (1980-2019)*. Universidad Autónoma de Sinaloa.

Enríquez-Fuenmayor, J. E. (2020, 9 de enero). La curva de Kuznets como medidor de crecimiento y desigualdad para el Ecuador. *Sapientiae, 1*(1), 40–56. https://publicacionescd.uleam.edu.ec/index.php/sapientiae/article/view/46

Flores-Xolocotzi, R. (2023). *Un estudio de desacoplamiento económico y áreas verdes urbanas en 305 municipios mexicanos*. *Decumanus, 11*(11). https://doi.org/10.20983/decumanus.2023.2.4

Freire-Noriega, E. A. (2021). *El crecimiento económico y el impacto ambiental a través de la curva de Kuznets en el Ecuador* [Trabajo de titulación]. Universidad Técnica de Ambato. Repositorio UTA. https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/34112

Freire-Vinueza, C., Meneses, K., & Cuesta, G. (2021). América Latina: ¿Un paraíso de la contaminación ambiental?. *Revista de Ciencias Ambientales, 55*(2), 1–18. http://dx.doi.org/10.15359/rca.55-2.1

Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). *Environmental impacts of a North American Free Trade Agreement* (NBER Working Paper No. 3914). National Bureau of Economic Research. https://doi.org/10.3386/w3914

Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *The quarterly journal of economics*, *110*(2), 353-377.

Guevara-Segarra, M. F., Guevara-Segarra, M. G., Quinde-Pineda, A. P., & Guerrero-Vásquez, L. F. (2025). Capital Formation and Oil Consumption Drive CO_2 Emissions in Ecuador: Evidence from an ARDL Model in Log-First Differences. *Sustainability, 17*(17), 7771. https://doi.org/10.3390/su17177771

Herrera Ríos, A. Y., & Terán-Pérez, B. M. (2024). México: Una economía acoplada a su degradación ambiental y sus costos ambientales de 2003 a 2020. *Regiones y Desarrollo Sustentable, 24*(45), 1–20. https://doi.org/10.63042/ybyrha30

Herrera Ríos, A. Y., & Soto Zazueta, I. M. (2024). Análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en México: Implicaciones Ambientales 2021–2023. En *Sustentabilidad en la gestión social de los recursos naturales: prácticas agropecuarias y vulnerabilidad multisectorial*, pp. 23–40. Universidad CESMAG. https://doi.org/10.15658/CESMAG25.19060104

Hussain, I., Ahmad, E., & Majeed, M. T. (2023). Curvature and turning point of the environmental Kuznets curve in a global economy: The role of governance. *Environmental Science and Pollution Research, 30*(18), 53007–53019. https://doi.org/10.1007/s11356-023-25835-7

Juárez, M. P. (2024). Estimación de la curva de Kuznets ambiental para México, 1974–2020. *Boletín Científico de las Ciencias*

Económico Administrativas del ICEA, 13(Especial), 44–56. https://doi.org/10.29057/icea.v13iEspecial.12084

López-Menéndez, A. J., Rodríguez, M. A., & Suárez, R. P. (2006). Crecimiento económico y desigualdad: Nuevas extensiones del proceso de Kuznets. *Estudios de Economía Aplicada, 24*(1), 221–244.

López-Teloxa, C., Monterroso-Rivas, A. I., & Gómez-Díaz, J. D. (2020). Organic carbon in agricultural soils of the Mexican tropics. *Revista de Geografía Agrícola, (64)*, 107–117. https://doi.org/10.5154/r.rga.2020.64.07

Mahmood, H. (2023). Trade, FDI, and CO_2 emissions nexus in Latin America: The spatial analysis in testing the pollution have and the EKC hypotheses. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(6), 14439–14454. https://doi.org/10.1007/s11356-022-23154-x

Meza-López, P., Trujillo-Delgado, M. K., Burciaga-Álvarez, A. U., De la Cruz-Carrera, R., & Nájera-Luna, J. A. (2021). Carbon footprint estimate in the primary wood processing industry in El Salto, Durango. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 27*(2), 267–283. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.07.060

Mishra, M. K. (2020). *The Kuznets curve for the sustainable environment and economic growth* (ESRB Working Paper No. 216734). ZBW – Leibniz Information Centre for Economics. https://www.econstor.eu/handle/10419/216734

Mosconi, E. M., Colantoni, A., Gambella, F., Cudlinová, E., Salvati, L., & Rodrigo-Comino, J. (2020). Revisiting the environmental Kuznets curve: The spatial interaction between economy and territory. *Economies, 8*(3), 74. https://doi.org/10.3390/economies8030074

Muñoz Ramos, T., & Osorio Caballero, M. I. (2023). Prueba de la curva ambiental de Kuznets: El papel de las instituciones y la complejidad económica en países de América Latina. *Economía Informa, (443)*, 19–29. http://www.economia.unam.mx/assets/pdfs/econinfo/443/02TaniaMunoz.pdf

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [OCDE]. (2023). Environment at a Glance in Latin America and the Caribbean: Spotlight on Climate Change. OECD Publishing.

Riveros-Gavilanes, J. M., & Reyes-Vargas, A. M. (2023a). CO2 Pollution and Economic Growth: Heterogeneous Behavior for Latin America? *Sociedad y Economía, 48*, e10612013. https://doi.org/10.25100/sye.v0i48.12013

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2022). *Informe de la situación del medio ambiente en México 2022*. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/index.html

Suárez-Venero, G. M. (2019). Tree diversity and stored carbon in cocoa agroforestry systems. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 25*(1), 1–15. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.11.065

Terán-Pérez, B. M., Herrera Ríos, A. Y., & Becerra Pérez, L. A. (2025). Perspectives on the environmental Kuznets curve in America: A static panel approach for the period 2010–2020. *Vértice Universitario, 27*(96), e206. https://doi.org/10.36792/rvu.v27i96.206

Wang, Y., Liu, M., Wang, S., Cui, X., Hao, L., & Gen, H. (2022). Assessing the impact of governance and health expenditures on carbon emissions in China: Role of environmental regulation. *Frontiers in Public Health, 10*, 949729. https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.949729

Xu, H., Zhang, C., Li, W., Zhang, W., & Yin, H. (2018). Economic growth and carbon emission in China: A spatial econometric Kuznets curve? *Zbornik Radova Ekonomskog Fakulteta u Rijeci, 36*(1), 11–28. https://doi.org/10.18045/zbefri.2018.1.11