



Sector industrial y emisiones de PM2.5 en las principales economías del mundo

Industrial sector and PM2.5 emissions in the world's major economies

Jonathan Hernández-Pérez

Instituto de Ciencias Agrícolas

Universidad Autónoma de Baja California, México

0000-0002-8892-8115 | jonathan.hernandez80@uabc.edu.mx

Blanca Margarita Montiel-Batalla*

Instituto de Ciencias Agrícolas

Universidad Autónoma de Baja California, México

0000-0003-0959-5365 | blanca.montiel@uabc.edu.mx

*Autor para correspondencia

Jimena Achiquen-Millán

Instituto de Ciencias Agrícolas

Universidad Autónoma de Baja California, México

0000-0003-4617-2759 | jimena.achiquen@uabc.edu.mx

Cita APA: Hernández-Pérez, P. J., Montiel-Batalla, B. M. y Achiquen-Millán, J. (2025). Sector industrial y emisiones de PM2.5 en las principales economías del mundo. *Revista Arbitrada de Ciencias Ambientales*, 1(1), 7-21. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18487454>

Resumen

La contaminación del aire es uno de los problemas que más aqueja a la población de las zonas urbanas y de los países más industrializados. Dentro de los contaminantes más comunes se encuentra el material particulado con diámetros aerodinámicos menores a 2.5 micrómetros (PM2.5), el cual proviene principalmente de la industria. El objetivo del presente trabajo fue determinar el efecto que tiene el tamaño del sector industrial en las emisiones de PM2.5 en las principales economías del mundo, mediante una regresión con datos de panel, con el método de mínimos cuadrados generalizados factibles (MCGF). El panel incluyó 11 países (India, China, México, Rusia, Alemania, Brasil, Francia, Inglaterra, Japón, Estados Unidos y Canadá) durante un periodo de 14 años (1998 a 2011). Los resultados sugieren que un aumento del 1% en la participación del sector industrial como proporción del producto interno bruto (PIB) se asocia con un incremento del 0.43% en las concentraciones de material particulado PM2.5. La descarbonización, la reducción de la dependencia de combustibles fósiles y la transición hacia el consumo de energías limpias, puede reducir las emisiones en la industria y los efectos negativos en la salud de la población, del medio ambiente y de la economía.

Palabras clave: combustibles fósiles, contaminación del aire, efectos aleatorios, energía renovable, panel.

Abstract

Air pollution is one of the most pressing problems facing urban populations and the most industrialized countries. Among the most common pollutants is particulate matter with aerodynamic diameters less than 2.5 micrometers (PM2.5), which originates primarily from industry. The objective of this study was to determine the effect of the size of the industrial sector on PM2.5 emissions in the world's major economies using panel data regression using the generalized least feasible squares (GLFS) method. The panel included 11 countries (India, China, Mexico, Russia, Germany, Brazil, France, England, Japan, the United States, and Canada) over a 14-year period (1998–2011). The results suggest that a 1% increase in the share of the industrial sector as a proportion of gross domestic product (GDP) is associated with a 0.43% increase in PM2.5 particulate matter concentrations. Decarbonization, reducing dependence on fossil fuels, and transitioning toward clean energy consumption can reduce industrial emissions and the negative effects on people's health, the environment, and the economy.

Key Words: fossil fuels, air pollution, random effects, renewable energy, panel.

Introducción

La contaminación atmosférica es uno de los principales desafíos que enfrentan las poblaciones urbanas y los países altamente industrializados. El sector manufacturero destaca como la mayor fuente de emisiones de material particulado menor a 2.5 micrómetros (PM2.5) (Mahapatra *et al.*, 2021; Mohyuddin *et al.*, 2024), producto del elevado consumo de combustibles fósiles en motores y calderas (Mo *et al.*, 2023).

Este fenómeno se ha intensificado con la globalización, ya que la creciente demanda internacional ha acelerado la industrialización, incrementando tanto el uso de recursos como los niveles de polución (Wang *et al.*, 2018). Como resultado, el desarrollo económico, la expansión industrial y el crecimiento urbano han elevado sostenidamente las concentraciones de PM2.5 en el aire (Li *et al.*, 2016). Esta incidencia del sector manufacturero en los niveles de PM2.5 no sigue un patrón constante a lo largo del tiempo. Si bien los procesos industriales, impulsados por una mayor producción y tecnologías contaminantes, son determinantes en la degradación de la calidad del aire, su impacto presenta variaciones no lineales (Zambrano-Monserrate *et al.*, 2024).

Las PM2.5 se encuentran entre los contaminantes más significativos a nivel mundial (Wang *et al.*, 2018); entran en el sistema respiratorio por inhalación, causando enfermedades respiratorias, cardiovasculares, del sistema nervioso central y cáncer (Manisalidis *et al.*, 2020). A nivel mundial, mueren prematuramente más de 3 millones de personas cada año por exposición prolongada a PM2.5, sobre todo en las regiones del este y sudeste asiático, que están experimentando una rápida industrialización y urbanización (Jerrett, 2015). La rápida industrialización y el desarrollo económico en el sur de Asia han causado graves problemas relacionados con la contaminación del aire (ul-Haq *et al.*, 2023).

Se estima que China tiene mayor exceso de mortalidad debido a la exposición a largo plazo a PM2.5, seguido de India y Pakistán (Chowdhury *et al.*, 2022). En 2019, el número de muertes por exposición a este contaminante fueron de 1.7 millones en China, 1.5 millones en India, 230 mil en Pakistán, 197 mil en Nigeria, 184 mil en Indonesia y 169 mil en Bangladesh, mientras que en México esta cifra fue 46 mil (Banco Mundial, 2022). En la región de Oriente Medio más del 90 % de la contaminación por partículas finas es de origen antrópico, principalmente proveniente de la producción de energía fósil, la industria petroquímica y el intenso transporte marítimo (Osipov *et al.*, 2022).

Consecuentemente, la exposición a largo plazo de PM2.5 incrementa los costos de vida de la población relacionados a problemas de salud (Xu *et al.*, 2025), especialmente en las personas mayores (Yin *et al.*, 2021). A nivel mundial, los costos económicos relacionadas a la salud y contaminación del aire por

PM2.5 representaron de 4.4 a 6.1% del Producto Interno Bruto (PIB). Sin embargo, los costos más altos fueron en la región Europa y Asia Central: Serbia en primer lugar (18.9%), Bulgaria (16.3%), Macedonia del Norte (15.9%); y en la región Asia Oriental y el Pacífico: China (12.9%), Nueva Guinea (12.0%) y Myanmar (11.4%) (Banco Mundial, 2022).

Según el Índice de Desempeño Ambiental 2024, en la categoría de calidad del aire, los países que ocupan las últimas posiciones entre los 180 evaluados son Nepal, Pakistán, Bangladesh e India. China se ubica en el puesto 168, mientras que México se encuentra en la posición 129 (Block *et al.*, 2024). Es decir, estos países tuvieron el peor desempeño en la gestión de la calidad del aire.

Luo *et al.* (2018) realizaron un estudio sobre los determinantes socioeconómicos que influyen sobre las concentraciones de PM2.5; de los cuales, la proporción del sector secundario de la economía es la que más contribuye al aumento de las concentraciones. Los factores que siguen son: el PIB per cápita, la urbanización, la población, la intensidad energética y la proporción del sector terciario. Por su parte, Xie y Sun (2020) analizaron los efectos que tienen la inversión extranjera directa (IED) sobre las concentraciones de PM2.5 concluyendo que a niveles más bajos de IED, estas tienen un efecto positivo en la reducción de las concentraciones.

La actual crisis climática y energética requiere una transición acelerada hacia un sistema energético verde, bajo en carbono y eficiente (Yang *et al.*, 2025) para lograr los objetivos del desarrollo sostenible 3 “salud y bienestar”, 7 “energía asequible y no contaminante”, y 9 “industria, innovación e infraestructura”. Adicionalmente, el aumento de los fenómenos meteorológicos extremos como el frío y el calor extremo aumentan la demanda de energía, disminuyen la eficiencia energética y amplifican el consumo de carbón; en consecuencia, elevan la intensidad de la contaminación por PM2.5 (Jiang *et al.*, 2024). Por lo tanto, mejorar la calidad del aire es clave para la salud pública, y se necesitan políticas para reducir tanto los riesgos ambientales como las enfermedades crónicas (Huibin Mo & Wang, 2024). Es necesario planificar y adoptar políticas de control para reducir la contaminación atmosférica y los impactos económicos (Salehi *et al.*, 2023).

Existen diversos estudios que analizan la hipótesis de la curva de Kuznets ambiental, aunque la mayoría se centra en el CO₂ como variable principal (Guo & Shahbaz, 2024). Sin embargo, las investigaciones sobre material particulado PM2.5 son escasas. Algunos trabajos han explorado los determinantes de sus concentraciones, pero estos suelen limitarse geográficamente, con un enfoque predominante en China. Esta omisión es particularmente relevante, pues las estrategias de mitigación requieren evidencia robusta sobre los determinantes específicos de estas emisiones en

diferentes contextos económicos. Este trabajo busca cuantificar la relación entre el tamaño del sector industrial y las emisiones de PM2.5 en las principales economías mundiales durante el periodo 1998-2011, empleando un enfoque de datos panel. A diferencia de estudios previos, el análisis distingue entre efectos estructurales y perturbaciones transitorias, con el fin de proporcionar bases empíricas para políticas ambientales diferenciadas según las características de cada economía.

Materiales y métodos

Para determinar el efecto que tiene el sector industrial sobre las emisiones de PM2.5 se planteó un modelo de regresión con datos panel (Ecuación 1). El panel de datos consiste en una combinación de datos de corte transversal con una serie de tiempo, el cual incluyó 11 países: India, China, México, Rusia, Alemania, Brasil, Francia, Inglaterra, Japón, Estados Unidos y Canadá; y un periodo de 14 años, que va de 1998 a 2011. La selección del periodo analizado fue con base en la disponibilidad de datos del Banco Mundial. Sin embargo, la elección de los países fue con relación a la clasificación de las principales economías del mundo según el PIB en dólares estadounidenses a precio actuales, publicados por el Banco Mundial (BM, 2025).

$$PM2.5_{it} = \beta_0 + \beta_1 IND_{it} + \beta_2 EFOSIL_{it} + \beta_3 ERENOV_{it} + \beta_4 PIBPC_{it} + \epsilon_{it} \quad (Ec. 1)$$

Donde:

Los subíndices it , se refieren a los países y a los años, respectivamente.

$PM2.5_{it}$ es el logaritmo natural de la contaminación del aire por PM2.5, medida por la exposición anual media (microgramos por metro cúbico). La exposición se calcula ponderando las concentraciones medias anuales de PM2.5 por población, tanto en zonas urbanas como rurales.

IND_{it} es el logaritmo natural del valor agregado de la industria como porcentaje del PIB. Se espera que, a mayor tamaño de la industria, mayor efecto positivo sobre las emisiones de PM2.5.

$EFOSIL_{it}$ representa el logaritmo natural del consumo de energía procedente de combustibles fósiles como porcentaje del total. El combustible fósil comprende los productos de carbón, aceite, petróleo y gas natural. Se espera que un mayor consumo de energía fósil genere un aumento en las emisiones contaminantes, lo cual se reflejaría en un coeficiente positivo para esta variable en el modelo de regresión.

$ERENOV_{it}$ representa el logaritmo natural del consumo de energía renovable como porcentaje del consumo total de energía final. La evidencia teórica y empírica sugiere que el uso de energías renovables está inversamente asociado con la concentración de PM2.5, por lo que su coeficiente en el modelo debería ser negativo.

$PIBPC_{it}$ es el logaritmo natural del PIB per cápita. Es decir, el producto interno bruto dividido por la población a mitad de año. El PIB es la suma del valor agregado bruto de todos los productores residentes en la economía más los impuestos sobre los productos y menos los subsidios no incluidos en el valor de los productos. Se calcula sin hacer deducciones por depreciación de activos fabricados o por agotamiento y degradación de recursos naturales. Los datos están en dólares estadounidenses constantes de 2015 (BM, 2025).

ϵ_{it} captura fluctuaciones aleatorias por país y período.

β_{1-4} son los coeficientes que miden la relación entre las variables independientes y la variable dependiente.

Como señala Baltagi (2021), los datos de panel mejoran la eficiencia econométrica al combinar información transversal y temporal, controlando heterogeneidad no observable y reduciendo sesgos por variables omitidas. Además, permiten modelar estructuras flexibles de errores para abordar heterocedasticidad y autocorrelación. Se utilizó el comando `xtgls` en el paquete estadístico Stata con opciones de `panels(heteroskedastic)` y `corr(ar1)`.

La regresión se estimó mediante el método de Mínimos Cuadrados Generalizados Factibles (MCGF) para corregir la heterocedasticidad y autocorrelación. El estimador MCGF supera a mínimos cuadrados ordinarios MCO en tres dimensiones clave: i) eficiencia asintótica bajo heterocedasticidad y/o autocorrelación, ii) intervalos de confianza con menor amplitud, y iii) mayor potencia en contrastes de hipótesis (Hansen, 2007).

Resultados y discusión

Los países con mayores emisiones de PM2.5 son: India, China y México. Sin embargo, China tiene un sector industrial más grande que el resto de los países, seguido de México, Rusia y Japón. El consumo de energía fósil en todos los países incluidos en el panel representa más del 50%, mientras que Brasil destaca en el consumo energía renovable (Tabla 1).

Tabla 1. Media y desviación estándar de las variables por países, 1998-2011.

País	PM2.5	IND	EFOSIL	ERENOV	PIBPC
India	59.478	29.036	66.499	43.021	948.866
	4.35	1.825	3.205	4.388	192.921
China	50.126	46.063	84.27	20.621	3,576.359
	1.341	0.892	3.667	7.216	1,406.191
México	25.189	33.439	88.845	10.479	9,452.947
	4.429	0.991	1.179	1.203	256.105
Rusia	17.409	31.269	90.872	3.5	7,048.572
	2.601	1.809	0.454	0.171	1,635.802
Alemania	17.058	26.214	82.158	7.243	36,561.020
	0.987	0.951	1.658	3.39	2,046.811

Sector industrial y emisiones de PM2.5 en las principales economías del mundo

País	PM2.5	IND	EFOSIL	ERENOV	PIBPC
Brasil	15.331	22.97	55.042	45.207	7,540.511
	0.269	0.758	2.354	2.089	816.357
Francia	15.022	19.521	52.073	9.664	19.521
	0.973	1.271	1.625	1.037	1.271
Inglaterra	14.553	20.561	88.135	1.721	41,304.810
	1.473	1.528	1.161	1.028	2,444.087
Japón	12.289	30.006	82.272	4.143	32,277.260
	0.84	1.976	2.533	0.411	1,089.808
Estados Unidos	11.427	21.035	85.5	6.021	50,879.470
	1.405	1.134	0.888	1.14	2,716.938
Canadá	9.183	27.941	75.425	21.136	27.941
	0.84	1.259	0.604	0.884	1.259

La relación entre los datos observados del tamaño de la industria como porcentaje del PIB y la contaminación por PM2.5 es positiva (Figura 1). El coeficiente de correlación de Pearson fue 0.5919 y el de Spearman, 0.5183. Es decir, cuando la variable IND aumenta, la PM2.5 también lo hace. La correlación alta entre la proporción industrial del PIB y las emisiones de PM2.5, se debe a la mayor presencia de industrias basadas en carbón y a condiciones no favorables para la dispersión de contaminantes (S. Wang *et al.*, 2017).

El coeficiente de la variable IND para el modelo fue 0.43, con una significancia estadística menor al 5%, lo que sugiere que, dentro de este modelo, hay evidencia suficiente para afirmar que esta variable tiene un impacto determinante en la variable dependiente. Es decir, un aumento del 1% en la participación del sector industrial como proporción del PIB se asocia con un incremento del 0.43% en las concentraciones de material particulado PM2.5. El coeficiente estimado para el consumo de energía fósil revela una relación positiva y estadísticamente significativa con las emisiones contaminantes; específicamente, un incremento del 1% en el consumo de combustibles fósiles se asocia con un aumento del 0.25% en las emisiones de contaminantes atmosféricos. Los resultados indican que el consumo de energía renovable tiene un efecto reductor sobre las concentraciones de PM2.5, aunque este impacto es marginal y estadísticamente no significativo. También, muestran una relación negativa entre el ingreso per cápita y las emisiones de PM2.5; específicamente, un incremento del 1% en el PIBPC se asocia con una disminución del 0.02% en las concentraciones de este contaminante (Tabla 2).

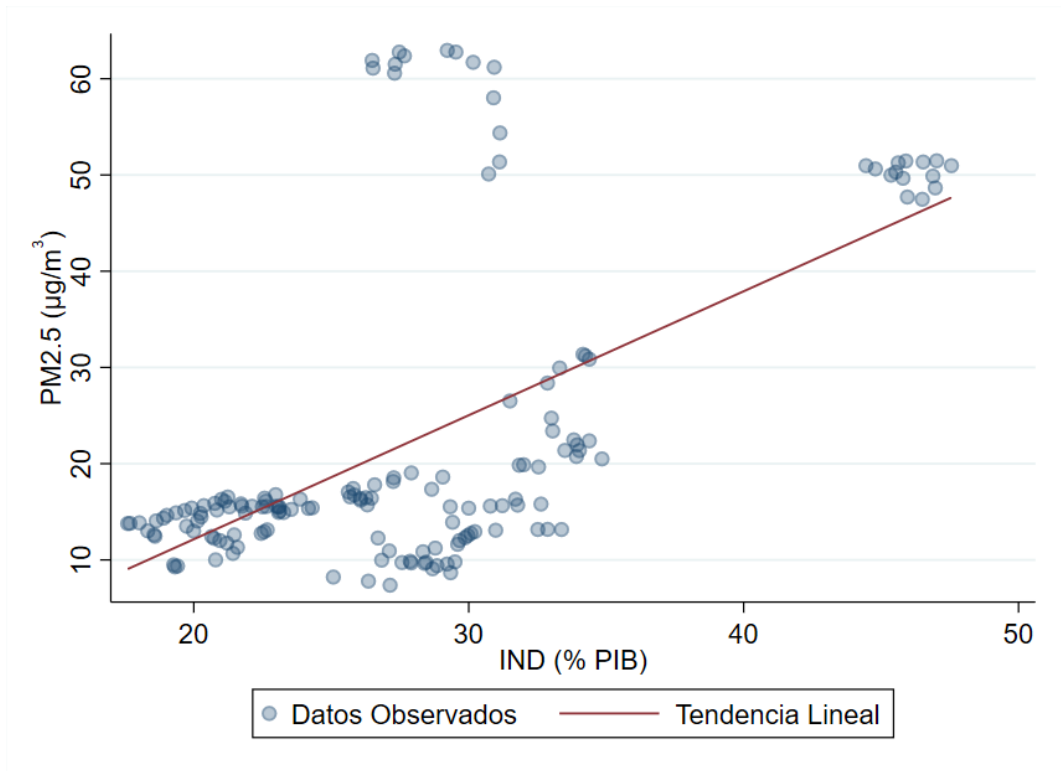


Figura 1. Relación entre las variables IND y PM2.5

Tabla 2. Resultados de las estimaciones del modelo de regresión

	1
IND	0.4302*** (0.0859)
EFOSIL	0.2582* (0.1442)
ERENOV	-0.0007 (0.0238)
PIBPC	-0.0209* (0.0112)
CONSTANTE	0.4907 (0.5575)
Observaciones	154
Grupos	11
Periodo	14
Wald χ^2 (4)	38.79***

Nota: significancia estadística: <0.1 *, <0.05 **, <0.01 ***. Error estándar entre paréntesis.

Los modelos lineales de datos de panel mediante mínimos cuadrados generalizados factibles permiten la estimación en presencia de autocorrelación AR(1) dentro de los paneles, así como correlación transversal y heterocedasticidad entre paneles. Sin embargo, debido a que este modelo hace una serie de transformaciones no estima R cuadrada (Wooldridge, 2010). El estadístico Wald χ^2 con 4 grados de libertad, significativamente menos de

1%, indica que al menos un coeficiente de las variables independientes es diferente de cero.

Los diferentes niveles de urbanización tienen efectos positivos sobre las emisiones de PM2.5 en aquellas ciudades con mayor presencia de industrias con uso intensivo de energía, como la producción de cemento y acero. El desarrollo económico de este sector ha estado acompañado de un alto consumo de combustibles fósiles (S. Wang *et al.*, 2017). No obstante, los impactos son menores en los países desarrollados debido a que durante la globalización, la industria manufacturera creció rápidamente en los países en desarrollo (Q. Wang *et al.*, 2019).

Los países con alto consumo de carbón para energía y para la industria, por ejemplo, China, India y Rusia, presentan severos problemas con las concentraciones de PM2.5, hasta 10 veces superiores al límite recomendado (OMS, 2021). Las exposiciones altas a contaminación por PM2.5 ocasiona problemas en la salud de la población y de los trabajadores en la industria, de manera que se incrementa el costo por problemas relacionados a la salud y reduce el bienestar de la población en general. Asimismo, puede mermar la productividad laboral en el sector industrial (Abidin *et al.*, 2023; Joshi *et al.*, 2025).

Los resultados son consistentes con los hallazgos de Zambrano-Monserrate *et al.* (2024), quienes identifican que la industrialización incrementa las concentraciones de PM2.5. No obstante, estos autores sugieren que es posible implementar políticas para reducir dichas emisiones sin comprometer el nivel de actividad industrial.

Mo *et al.*, (2023) proponen la transferencia de industrias tradicionales a zonas menos industrializadas, promover la descarbonización industrial y la modernización tecnológica industrial para reducir la dependencia de energía fósil. Lo anterior, exacerbaría la intensidad de la contaminación atmosférica con menor concentración de PM2.5 por unidad de PIB industrial. Las políticas para reducir las emisiones de PM2.5 deben enfocarse en estos factores estructurales.

El uso de tecnologías de energía renovable limpia y alternativa basadas en energía solar y eólica, reduciría los impactos económicos sobre la salud y de las economías (Chowdhury *et al.*, 2022; F. Yang *et al.*, 2024). Es decir, sustituir el consumo de combustibles fósiles por gas natural (Dong *et al.*, 2018) u otras fuentes de energías renovables, puede contribuir a reducir las emisiones de PM2.5 en los países más industrializados. Muestra de ello son Islandia y Finlandia, que gracias a un estricto control de la contaminación atmosférica en el sector industrial, así como a la expansión de los mercados de vehículos eléctricos, lograron reducir sus niveles de emisiones (Block *et al.*,

2024). Mientras que en India, pese a existir un marco regulatorio, su aplicación resulta inconsistente y fragmentada (X. Jiang, 2023).

En México el problema de la contaminación fue por la sobre industrialización en las ciudades más pobladas y al bajo consumo de energías renovables (Silva Rodríguez, 2018). Sin embargo, en los últimos años ha demostrado avances significativos mediante programas de gestión de calidad del aire, aunque persisten retos críticos, particularmente en el control de emisiones derivadas de la combustión de diésel y de procesos industriales (Amador-Muñoz *et al.*, 2022).

Pese a que los niveles de contaminación por PM_{2.5} afectan los ingresos personales debido a los costos en la salud y a la reducción en la productividad laboral (Lian *et al.*, 2025; Lin *et al.*, 2024). También existe una relación entre niveles socioeconómicos más bajos con concentraciones de PM_{2.5} más altas, debido a que las industrias contaminantes están ubicadas cerca de barrios de bajos ingresos (Chakraborti & Voorheis, 2025).

Un mayor nivel de ingresos contribuye a reducir la contaminación del aire mediante múltiples mecanismos interrelacionados. Según la hipótesis de la Curva de Kuznets Ambiental, al alcanzar cierto umbral de desarrollo, las sociedades priorizan políticas ambientales más estrictas e invierten en tecnologías limpias, facilitando la transición hacia economías menos intensivas en contaminación (Dinda, 2004). Sin embargo, este proceso puede generar injusticia ambiental, ya que los hogares de mayores ingresos suelen trasladarse a zonas menos contaminadas, mientras las comunidades vulnerables quedan expuestas a mayores riesgos (Banzhaf & Walsh, 2006). Además, la educación y conciencia ambiental, asociadas a mayores ingresos, impulsan demandas sociales por sostenibilidad (Hu *et al.*, 2025).

Conclusiones

Se concluye que el crecimiento en el sector industrial tiene efectos sobre la contaminación por PM_{2.5} en las principales economías del mundo. Estos efectos están relacionados con las características estructurales de cada país y no con shocks temporales, tales como crisis económicas, desastres naturales, conflictos geopolíticos o fluctuaciones en los precios de los energéticos. Es decir, a medida que incrementa el tamaño del sector industrial, la contaminación por PM_{2.5} también incrementa, sobre todo en aquellas economías con alta dependencia en energías fósiles. Por lo que, una alternativa es descarbonizar y transitar hacia el consumo de energías limpias. Lo anterior puede contribuir a reducir los impactos negativos sobre la salud de la población, del medio ambiente y de la economía.

Si bien el ingreso per cápita muestra un efecto reductor, su magnitud es insuficiente para compensar el impacto de actividades contaminantes. La

transición hacia un modelo industrial y energético bajo en carbono no solo es deseable, sino urgente, para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible.

La mitigación de PM2.5 en países industrializados demanda políticas integradas que equilibren crecimiento económico y salud pública, priorizando tecnologías limpias y equidad territorial. La experiencia internacional muestra que acciones decididas pueden lograr reducciones significativas.

Se sugiere nuevas investigaciones con análisis de econometría espacial, debido a que el viento transporta contaminantes atmosféricos a través de las fronteras políticas. Consecuentemente, la calidad del aire en un país puede depender de las actividades de sus vecinos.

Referencias

- Abidin, A. U., Maziya, F. B., Susetyo, S. H., Yoneda, M., & Matsui, Y. (2023). Exposure particulate matter (PM2.5) and health risk assessment on informal workers in landfill site, Indonesia. *Environmental Challenges*, 13, 100795. <https://doi.org/10.1016/J.ENVCL.2023.100795>
- Amador-Muñoz, O., González-Ramírez, A. E., & Villalobos-Pietrini, R. (2022). Polycyclic aromatic hydrocarbons in PM2.5 in the metropolitan zone of Mexico Valley: Impact of air quality management programmes. *Urban Climate*, 42, 101096. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2022.101096>
- Banco Mundial. (2022). The Global Health Cost of PM2.5 Air Pollution: A Case for Action Beyond 2021. The Global Health Cost of PM2.5 Air Pollution: A Case for Action Beyond 2021. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1816-5>
- Banzhaf, H. S., & Walsh, R. (2006). Do People Vote with Their Feet? An Empirical Test of Environmental Gentrification. RFF Working Paper Series. <https://ideas.repec.org/p/rff/dpaper/dp-06-10.html>
- Block, S., Emerson, J. W., Esty, D. C., de Sherbinin, A., & Wendling, Z. A. (2024). Environmental Performance Index 2024. Yale Center for Environmental Law & Policy. <https://epi.yale.edu/downloads/2024-epi-report-20250106.pdf>
- BM. (2025). Datos de libre acceso del Banco Mundial. <https://datos.bancomundial.org/indicador>
- Chakraborti, L., & Voorheis, J. (2025). Is air pollution increasing in poorer localities of Mexico? Evidence from PM 2.5 satellite data. *Environment and Development Economics*, 30(1), 52–69. <https://doi.org/10.1017/S1355770X24000251>
- Chowdhury, S., Pozzer, A., Haines, A., Klingmüller, K., Münzel, T., Paasonen, P., Sharma, A., Venkataraman, C., & Lelieveld, J. (2022). Global health burden of ambient PM2.5 and the contribution of anthropogenic black carbon and organic aerosols. *Environment International*, 159, 107020. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.107020>
- 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>

- Dong, K., Sun, R., Dong, C., Li, H., Zeng, X., & Ni, G. (2018). Environmental Kuznets curve for PM2.5 emissions in Beijing, China: What role can natural gas consumption play? *Ecological Indicators*, 93, 591–601. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.045>
- Guo, X., & Shahbaz, M. (2024). The existence of environmental Kuznets curve: Critical look and future implications for environmental management. *Journal of Environmental Management*, 351, 119648. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2023.119648>
- Hansen, C. B. (2007). Generalized least squares inference in panel and multilevel models with serial correlation and fixed effects. *Journal of Econometrics*, 140(2), 670–694. <https://doi.org/10.1016/J.JECONOM.2006.07.011>
- Hu, B., Wang, C., Xia, Z., Lu, C., & Ju, X. (2025). Environmental education in low-income and middle-income countries: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Environmental Psychology*, 104, 102613. <https://doi.org/10.1016/J.JENVP.2025.102613>
- Jerrett, M. (2015). Atmospheric science: The death toll from air-pollution sources. *Nature*, 525(7569), 330–331. <https://doi.org/10.1038/525330a>
- Jiang, L., Yang, Y., Wu, Q., Yang, L., & Yang, Z. (2024). Hotter days, dirtier air: The impact of extreme heat on energy and pollution intensity in China. *Energy Economics*, 130, 107291. <https://doi.org/10.1016/J.ENERCO.2023.107291>
- Jiang, X. (2023). A conversation on air pollution in India. *Nature Geoscience*, 16(11), 937–938. <https://doi.org/10.1038/S41561-023-01306-z>
- Joshi, D. C., Negi, P., Devi, S., Lohani, H., Kumar, R., Gupta, M., & Ming, L. C. (2025). Fine particulate matter (PM2.5, PM10): A silent catalyst for chronic lung diseases in India; a comprehensive review. *Environmental Challenges*, 20, 101215. <https://doi.org/10.1016/J.ENVC.2025.101215>
- Li, G., Fang, C., Wang, S., & Sun, S. (2016). The Effect of Economic Growth, Urbanization, and Industrialization on Fine Particulate Matter (PM2.5) Concentrations in China. *Environmental Science and Technology*, 50(21), 11452–11459. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02562>
- Lian, L., Huang, J., Chen, S., Ma, J., Lian, X., Zhang, L., Du, S., & Zhao, D. (2025). Global health risk attributable to PM2.5 pollution in relation to wealth inequality. *Journal of Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/J.JES.2025.03.045>
- Lin, J., Wan, H., & Yu, Y. (2024). What you breathe makes you poor: The effect of air pollution on income. *China Economic Review*, 83, 102103. <https://doi.org/10.1016/J.CHIECO.2023.102103>
- Luo, K., Li, G., Fang, C., & Sun, S. (2018). PM2.5 mitigation in China: Socioeconomic determinants of concentrations and differential control policies. *Journal of Environmental Management*, 213, 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.044>
- Mahapatra, P. S., Panda, U., Mallik, C., Boopathy, R., Jain, S., Sharma, S. K., Mandal, T. K., Senapati, S., Satpathy, P., Panda, S., & Das, T. (2021). Chemical, microstructural,

-
- and biological characterization of wintertime PM_{2.5} during a land campaign study in a coastal city of eastern India. *Atmospheric Pollution Research*, 12(9), 101164. <https://doi.org/10.1016/J.APR.2021.101164>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers in Public Health*, 8, 505570. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Mo, Haihua, You, Y., Wu, L., Yan, F., Chang, M., Wang, W., Wang, P., & Wang, X. (2023). Potential impact of industrial transfer on PM_{2.5} and economic development under scenarios oriented by different objectives in Guangdong, China. *Environmental Pollution*, 316, 120562. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120562>
- Mo, Huibin, & Wang, S. (2024). Assessing the spatiotemporal evolution and socioeconomic determinants of PM_{2.5}-related premature deaths in China from 2000 to 2021. *Science of The Total Environment*, 946, 174323. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174323>
- Mohyuddin, S., Alam, K., Zeb, B., Khokhar, M. F., Mir, K. A., Wexler, A. S., Haq, E. ul, Ikram, M., & Shahid, I. (2024). Characterization and source identification of PM_{2.5} during intense haze episodes in an urban environment of Lahore. *Atmospheric Environment: X*, 23, 100276. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2024.100276>
- OMS. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- Osipov, S., Chowdhury, S., Crowley, J. N., Tadic, I., Drewnick, F., Borrmann, S., Eger, P., Fachinger, F., Fischer, H., Predybaylo, E., Fnais, M., Harder, H., Pikridas, M., Vouterakos, P., Pozzer, A., Sciare, J., Ukhov, A., Stenchikov, G. L., Williams, J., & Lelieveld, J. (2022). Severe atmospheric pollution in the Middle East is attributable to anthropogenic sources. *Communications Earth and Environment*, 3(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/S43247-022-00514-6>
- Salehi, M., Hashiani, A. A., Karimi, B., & Mirhoseini, S. H. (2023). Estimation of health-related and economic impacts of PM_{2.5} in Arak, Iran, using BenMAP-CE. *PLOS ONE*, 18(12), e0295676. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295676>
- Silva Rodríguez, J. A. (2018). Management of air pollution in Mexico. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 30(3), 578–592. <https://doi.org/10.1108/MEQ-05-2018-0099>
- ul-Haq, Z., Mehmood, U., Tariq, S., & Mariam, A. (2023). Defining the role of renewable energy, economic growth, globalization, energy consumption, and population growth on PM_{2.5} concentration: evidence from South Asian countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(14), 40008–40017. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-25046-6>
- Wang, N., Zhu, H., Guo, Y., & Peng, C. (2018). The heterogeneous effect of democracy, political globalization, and urbanization on PM_{2.5} concentrations in G20 countries: Evidence from panel quantile regression. *Journal of Cleaner Production*, 194, 54–68. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.092>
-

- Wang, Q., Kwan, M. P., Zhou, K., Fan, J., Wang, Y., & Zhan, D. (2019). The impacts of urbanization on fine particulate matter (PM_{2.5}) concentrations: Empirical evidence from 135 countries worldwide. *Environmental Pollution*, 247, 989–998. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2019.01.086>
- Wang, S., Zhou, C., Wang, Z., Feng, K., & Hubacek, K. (2017). The characteristics and drivers of fine particulate matter (PM_{2.5}) distribution in China. *Journal of Cleaner Production*, 142, 1800–1809. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.11.104>
- Wang, X., Dewancker, B. J., Tian, D., & Zhuang, S. (2024). Exploring the Burden of PM_{2.5}-Related Deaths and Economic Health Losses in Beijing. *Toxics* 2024, Vol. 12, Page 377, 12(6), 377. <https://doi.org/10.3390/toxics12060377>
- Wooldridge, J. M. (2010). *The Econometric Analysis of Crosssection and Panel Data*. The MIT Press.
- Xie, Q., & Sun, Q. (2020). Assessing the impact of FDI on PM_{2.5} concentrations: A nonlinear panel data analysis for emerging economies. *Environmental Impact Assessment Review*, 80, 106314. <https://doi.org/10.1016/J.EIAR.2019.106314>
- Xu, X., Huang, L., Yao, L., Yoshida, Y., & Long, Y. (2025). Rising socio-economic costs of PM_{2.5} pollution and medical service mismatching. *Nature Sustainability* 2025 8:3, 8(3), 265–275. <https://doi.org/10.1038/s41893-025-01509-9>
- Yang, F., Yu, J., Zhang, C., Li, L., Lei, Y., Wu, S., Wang, Y., & Zhang, X. (2024). Spatio-temporal differentiation characteristics and the influencing factors of PM_{2.5} emissions from coal consumption in Central Plains Urban Agglomeration. *Science of The Total Environment*, 945, 173778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173778>
- Yang, X., Sun, H., Hu, X., & Li, L. (2025). Study on the impact of air pollution on health economy under the perspective of energy transition: A case of the Yangtze River Delta region in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 219, 115839. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2025.115839>
- Yin, H., Brauer, M., Zhang, J. (Jim), Cai, W., Navrud, S., Burnett, R., Howard, C., Deng, Z., Kammen, D. M., Schellnhuber, H. J., Chen, K., Kan, H., Chen, Z. M., Chen, B., Zhang, N., Mi, Z., Coffman, D. M., Cohen, A. J., Guan, D., ... Liu, Z. (2021). Population ageing and deaths attributable to ambient PM_{2.5} pollution: a global analysis of economic cost. *The Lancet Planetary Health*, 5(6), e356–e367. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00131-5](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00131-5)
- Zambrano-Monserrate, M. A., Subramaniam, Y., Adnan, N., Bergougui, B., & Adebayo, T. S. (2024). Dynamic factors driving PM_{2.5} concentrations: Fresh evidence at the global level. *Environmental Pollution*, 362, 124940. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124940>