

Análisis espacial curva de Kuznets ambiental para compuestos orgánicos volátiles en los estados México

Spatial Analysis of the Environmental Kuznets Curve for Volatile Organic Compounds in Mexican States

José Imanol Pérez-Vázquez ^a | Edson Valdés-Iglesias ^{b*}

Recibido: 17 de enero de 2025.

Aceptado: 16 de junio de 2025.

^a Universidad Veracruzana. Xalapa, México. Contacto: imapvaz18@gmail.com | ORCID:

^b Observatorio Económico y Financiero, Universidad Veracruzana. Xalapa, México. Contacto: edvaldes@uv.mx
| ORCID: [0000-0001-5851-3149](https://orcid.org/0000-0001-5851-3149) *Autor para Correspondencia

Cómo citar:

Pérez-Vázquez, J. I., Valdés Iglesias, E. (2025). Análisis espacial curva de Kuznets ambiental para compuestos orgánicos volátiles en los estados México. *UVserva*, (20), 302-318. <https://doi.org/10.25009/uvs.vi19.3080>

Resumen: Las emisiones de compuestos orgánicos volátiles generan problemas ambientales como smog y son potenciadores del cambio climático. En el presente artículo se analiza cómo la actividad económica, el sector secundario, la inversión extranjera directa y la densidad de población impactan en las emisiones de los compuestos orgánicos volátiles, esto con el modelo espacial Durbin, que considera la dependencia espacial de las entidades federativas. En la presente investigación se usan las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en los estados de México para el año 2018, buscando estimar la curva de Kuznets ambiental. La evidencia empírica muestra que existe la curva de Kuznets ambiental, además de que no hay evidencia empírica de la existencia de la hipótesis del paraíso contaminante y que los estados con mayor densidad de población disminuyen las emisiones de este contaminante.

Palabras clave: Compuestos orgánicos volátiles; curva de Kuznets ambiental; hipótesis de paraíso contaminante; dependencia espacial; modelo Durbin espacial.

Abstract: Emissions of volatile organic compounds are capable of producing environmental problems such as smog and exacerbating climate change. This article analyzes how economic activity, secondary sector, foreign direct investment and population density can influence emissions of volatile organic compounds, using the spatial Durbin model, which considers the spatial dependence of the federative entities. This research uses the emissions of volatile organic compounds in the states of Mexico for the year 2018, aiming to estimate the environmental Kuznets curve. Empirical evidence shows that the environmental Kuznets curve exists, and in addition to this, there is no empirical evidence of the existence of the polluting haven hypothesis and that states with higher population density reduce emissions of this pollutant.

Keywords: Volatile organic compounds; environmental Kuznets curve; pollution haven hypothesis; spatial dependence; spatial Durbin model.

Introducción

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) tienen el potencial de generar smog y ozono troposférico (O_3), estos compuestos son perjudiciales para la salud, además de que el O_3 puede potenciar el cambio climático (Sánchez Montero y Alcántara León, 2003; SEMARNAT e INE, 2005). Los COV se emiten de manera natural y por actividades humanas, ya que son utilizados en sectores como la industria, la agricultura, el transporte, entre otros, pero las emisiones se han incrementado en las décadas recientes (Water Resources Mission Area, 2019; Zhou *et al.*, 2023).

Los COV se consideran contaminantes del aire, y su estudio es importante, ya que influyen en varios problemas ambientales (Sánchez Montero y Alcántara León, 2003; SEMARNAT e INE, 2005). Con base en la revisión de la literatura que se proporcionará, la poca investigación de la CKA que considere la dependencia espacial (Kang *et al.*, 2016; Méndez Delgado *et al.*, 2023), estimar el efecto de la IED, es decir si se cumple la HPP o

la del halo de contaminación y el impacto de la densidad de población, el presente trabajo estima la CKA para los COV para el año 2018 entre los estados de México.

Las emisiones de COV para México en el 2018 fueron de 11 millones de toneladas, de las cuales 30% correspondió a actividades antropogénicas SEMARNAT (2024). Entre los estados de México, la cantidad de emisiones antropogénicas varía, por ejemplo, Baja California Sur emite cerca de 25 mil toneladas, mientras que el estado de México cerca de 400 mil toneladas. Analizar la perspectiva espacial es importante para la literatura ambiental (Mahmood, 2022).

La relación entre las emisiones y la actividad económica ha sido ampliamente estudiada con la curva de Kuznets ambiental (CKA), pero no se ha llegado a un consenso (Tiba y Belaid, 2020; Wang *et al.*, 2017). Este ha sido un tema predominante al momento de modelar la relación entre los contaminantes del aire y el crecimiento económico (Stern, 2017). La hipótesis de la CKA plantea que conforme se incrementa el ingreso, la contaminación del aire también lo hace, hasta un punto de inflexión respecto al ingreso, donde la contaminación del aire comienza a disminuir con incrementos en el ingreso, es decir, forma de “U” invertida (Dinda, 2004; Stern, 2017; Zilio, 2012).

Grossman y Krueger (1991) es una de las primeras investigaciones en plantear esta relación, describen tres efectos asociados al ingreso y que interactúan en la contaminación, el primero de ellos es el efecto escala que es asociado a cómo incrementos netos de la actividad económica incrementa de igual magnitud la contaminación, el segundo es el efecto composición que es asociado a la participación de cada sector en la economía, ya que estos tienen diferente intensidad en emisiones, como el secundario donde las emisiones de ciertos agentes es más intensiva que el de servicios, y el tercer efecto es el efecto tecnológico asociado a cómo se produce, ya que nuevas tecnologías podrían ser más limpias.

Selden y Song (1994) describen, que además del ingreso, existen otros factores que pueden ayudar a disminuir la contaminación, tales como la elasticidad positiva del ingreso hacia la calidad ambiental, el incremento de la conciencia ambiental a través de la educación, sistemas políticos más abiertos y la densidad de población. Sobre la densidad de población, explican que los gobiernos pueden centrar su esfuerzo en las zonas urbanas debido a los problemas inmediatos en la salud pública y el bajo costo de mejorar la calidad del aire en estas zonas. Con estimación de panel de efectos fijos (EF) para 28 países del mundo, encuentran una relación en forma de “U” entre el PIB per cápita real y las emisiones de dióxido de azufre (SO₂), partículas suspendidas, monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO_x), además de que la densidad de población disminuye la concentración de contaminantes.

Dinda (2004) realiza una recopilación teórica de los factores que pueden provocar cambios en el comportamiento de las emisiones, menciona los efectos escala, composición y tecnológico, la elasticidad del ingreso respecto a la demanda de calidad ambiental, el comercio internacional y la hipótesis del paraíso contaminante. En esta hipótesis los países con más ingresos incrementarían su regulación ambiental, con lo cual las industrias más intensivas en emisiones migrarían a países con menores ingresos y con menor regulación ambiental, de igual manera, los países con menores ingresos buscarían atraer inversión extranjera directa (IED) de estas industrias porque cuentan con ventaja comparativa en regulación menos estricta. Otro factor en la

difusión de tecnología más limpia a través del comercio internacional o de la IED. Además, agrega que la CKA no puede ser generalizada para todos los contaminantes y que esté presente a nivel local no indica que sea válida a nivel global y que no puede ser aplicada a todos los factores ambientales que son irreversibles.

La IED ha sido un tema central en la economía ambiental (Cheng *et al.*, 2020), pero no hay consenso entre esta y su relación con la contaminación del aire (Tiba y Belaid, 2020; Wang *et al.*, 2023). Esto se debe a la hipótesis del paraíso contaminante y a la hipótesis del halo de contaminación. La hipótesis del paraíso contaminante (HPP) plantea que desde los países más desarrollados, las industrias intensivas en contaminación tenderán a establecerse en países menos desarrollados y con menor regulación ambiental a través de la IED, ya que cuentan con una ventaja comparativa que permite atraer IED (Cheng *et al.*, 2020; Kochi y Medina López, 2013; Sapkota y Bastola, 2017). La del halo de contaminación plantea que los flujos de la IED reducen la degradación ambiental, ya que las empresas trasladan tecnología nueva y limpia (Ahmad *et al.*, 2021; Cheng *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2022; Zhang y Zhou, 2016).

Considerando la perspectiva espacial Maddison (2006) aborda la CKA desde esta óptica, ya que ignorarla podría generar estimaciones inconsistentes e inferencias incorrectas. Los efectos espaciales son importantes en la econometría, ya que permiten capturar los efectos inobservables de las unidades vecinas que afectan a cada sujeto de manera directa e indirecta y que no son tomados en cuenta en las regresiones convencionales (Anselin, 1988; LeSage, 2008). Maddison (2006), con datos panel de 1990 a 1995 para 135 países, estima la relación de la CKA a través de los modelos spatial autoregressive model (SAR), spatial error model (SEM) y Spatial lag of X (SLX), todos estos modelos permiten considerar la espacialidad. La evidencia empírica encontrada a través de SLX muestra que las emisiones de NO_x, VOC y CO tienen forma de “U”, mientras que SO₂ mantiene un crecimiento monótono, es decir, no se sustenta la CKA.

Georgiev y Mihaylov (2015), con datos panel para los países de la OCDE de 1990 a 2005 de las emisiones de óxidos de azufre (SO_x), gases de efecto invernadero (GEI), CO, NO_x y COV a través de los efectos marginales del modelo spatial Durbin Model (SDM), identifican que el PIB per cápita y la densidad de población tienen efectos no solo en sus respectivos países, sino también en sus vecinos, además, concluyen que la CKA solo existe para las emisiones de CO, COV y NO_x.

Armeanu *et al.* (2018), analizan los COV no metánicos (COVNM) para los países de la Unión Europea con el modelo Driscoll-Kraay de errores estándar. Como variables explicativas usaron el PIB per cápita y su cuadrado, buscando la CKA, los impuestos ambientales, el consumo energético, la formación bruta de capital, el gasto en investigación, porcentaje del PIB que pertenece a la industria, entre otros. Los resultados indican que hay CKA para los COVNM, además de que la participación de la industria en la economía incrementa las emisiones de este contaminante.

Huang (2018), explora la dependencia espacial de la IED de 30 provincias chinas de 2008 a 2013 para las emisiones de SO₂, esto lo realiza con el modelo SDM, como variables explicativas usa el PIB per cápita, su forma cuadrada, su forma cúbica, la IED, la densidad de población, las exportaciones e importaciones, la participación del sector secundario y la inversión en mitigación de las emisiones. La evidencia empírica muestra una relación en forma de “N”, es decir, la contaminación sube hasta un punto de inflexión, luego baja y vuelve a subir en el largo plazo, la densidad de población

disminuye las emisiones, la IED la disminuye, mientras que la participación del sector secundario incrementa las emisiones.

Para el caso de México, Méndez Delgado *et al.* (2023) exploran la dependencia espacial para los municipios del país con el modelo SDM, como variable de degradación ambiental usan las emisiones de PM2.5, PM10 y CO, como variables explicativas usan coeficientes de localización de población y de consumo de energéticos y la producción total bruta del sector manufacturero. Los resultados muestran que existe dependencia espacial y que la producción del sector manufacturero incrementa la contaminación del aire.

1. Metodología

1. 1. Recopilación de información

Para estimar la relación entre las actividades económicas medidas por el PIB per cápita, su forma cuadrada, su forma cúbica, así como el impacto del sector secundario, la inversión extranjera directa y la densidad de población en las emisiones de compuestos orgánicos volátiles, se recopiló información de diversas fuentes, todas para el año 2018. Cabe agregar que la información disponible sobre las emisiones no es continua en el tiempo ni en la periodicidad de la publicación, por lo cual no es posible realizar un análisis continuo. Las fuentes de información, así como el tratamiento de los datos, se muestran en la **Tabla 1**.

Tabla 1
Fuentes de información y procesamiento de datos

Variable	Unidad de medida	Fuente	Procesamiento
Compuestos orgánicos volátiles (COV)	Toneladas per cápita	SEMARNAT (2024)	SEMARNAT provee información de las emisiones de fuentes no naturales en toneladas, por lo cual se divide entre la población del estado
Producto interno bruto (PIB)	Pesos reales per cápita a precios 2013	INEGI (2022)	INEGI provee el PIB real, por lo cual se divide entre la población del estado
Producto interno bruto del sector secundario (PIBs)	Pesos reales per cápita a precios 2013	INEGI (2022)	INEGI provee el PIB real, por lo cual se divide entre la población del estado
Flujos de inversión extranjera directa (IED)	Pesos reales per cápita a precios 2013	Secretaría de Economía (2024)	SE provee información de los flujos de IED en millones de dólares, se transforman a pesos considerando el precio promedio reportando por BANXICO y se transforma a IED real usando el deflactor.
Densidad de población (DP)	Población kilómetro cuadrado	OCDE (2024)	OCDE provee información de la población total y la DP.

Fuente: Elaboración propia.

La elección de los COV está basada en lo hecho por Armeanu *et al.* (2018) y Georgiev y Mihaylov (2015), el uso del PIB per cápita hasta en su forma cuadrada en lo hecho por Huang (2018), el uso del sector secundario en lo hecho por Dogan e Inglesi-Lotz (2020) y Mun *et al.* (2016), la IED en Huang *et al.* (2022) y Kochi y Medina López (2013) buscando estimar si existe la HPP o la del halo de contaminación, y la densidad de población en lo realizado por Cheng *et al.* (2020) y Selden y Song (1994).

No se utilizan variables de regulación, dado que por su naturaleza no son observables y son muy difíciles de medir (Govea Franco *et al.*, 2024), aunque Cheng *et al.* (2020) conectan la regulación con la IED, ya que los estados pueden disminuir la regulación ambiental para atraer IED, es decir, son variables asociadas. Si bien existen diversos marcos legales locales, como los programas de mejoramiento de calidad del aire de diversas zonas metropolitanas o ciudades, no se analizan dado que no son el objetivo de este trabajo.

1.2. Metodología econométrica

No considerar la dependencia y los efectos espaciales en la estimación puede provocar estimadores sesgados (Anselin, 1988; Maddison, 2006). Para cuantificar los efectos espaciales, se utiliza una matriz de pesos espaciales W de tamaño $i * i$ donde toma el valor de 1 si es vecino del individuo y 0 si no es vecino (LeSage, 2008).

Elhorst (2014) y LeSage y Pace (2009), describen tres modelos espaciales que se encuentran en los análisis que consideran la dependencia espacial. El Spatial Autoregressive Model (SAR), el Spatial Error Model (SEM) y el Spatial Durbin Model (SDM), estos se observan en las ecuaciones 1, 2 y 3.

$$\begin{aligned} y &= pWy + X\beta + \varepsilon \quad (1) \\ y &= X\beta + u, \quad u = \lambda Wu + \varepsilon \quad (2) \\ y &= pWy + X\beta + WX\theta + \varepsilon \quad (3) \end{aligned}$$

El modelo SAR captura la dependencia espacial en pWy siendo este un término autorregresivo espacial. El SEM en los errores con el término λWu . El SDM captura el efecto espacial en pWy y en $WX\theta$ siendo este término un rezago espacial de las variables independientes.

Para probar la existencia de la dependencia espacial y siguiendo los pasos de Ding *et al.* (2024), Mahmood (2022) y Méndez Delgado *et al.* (2023), se utilizó el índice de Moran. De acuerdo con Anselin (1988), para detectar la autocorrelación espacial, el estadístico de Moran debe ser aplicado a los residuales de un modelo, en este caso a los residuales de la estimación por mínimos cuadrados ordinarios (MCO), el estadístico se aprecia en la ecuación 4.

$$I = (e^{\wedge'} W)/(e^{\wedge'} e) \quad (4)$$

Donde e es un vector de los residuales del modelo de MCO, W es la matriz de pesos espaciales normalizada, bajo la hipótesis nula de no dependencia espacial.

Para probar cuál modelo espacial es óptimo, Elhorst (2014) propone la prueba Likelihood Ratio (LR) y la prueba de Wald. Estas se aplican a los modelos SAR y SEM, bajo la hipótesis nula $H_0: \theta = 0$ y $H_0: \theta + p\beta = 0$, en caso de rechazar ambas hipótesis el modelo a estimar es el SDM. La estimación del modelo SDM para un solo periodo de estudio está basada en lo hecho por Méndez Delgado *et al.* (2023), ya que estima dos SDM para los años 2013 y 2016.

Para interpretar los efectos espaciales, se utilizan los efectos directos, indirectos y totales, ya que los coeficientes relacionados con la parte espacial no se pueden interpretar de manera directa tal como se haría en un modelo de mínimos cuadrados ordinarios (LeSage, 2008). Esto se debe a que es necesario tomar en cuenta los efectos de retroalimentación del modelo SDM, dado que cuenta con el parámetro p que permite medir la fuerza de la dependencia espacial y que la observación del estado i afecta al estado j y la observación del estado j también afecta al estado i (LeSage y Pace, 2009).

2. Resultados

En la tabla 2 se puede observar las estadísticas descriptivas de las variables de interés mencionadas en la tabla 1.

Tabla 2

Estadística descriptiva de las variables de interés

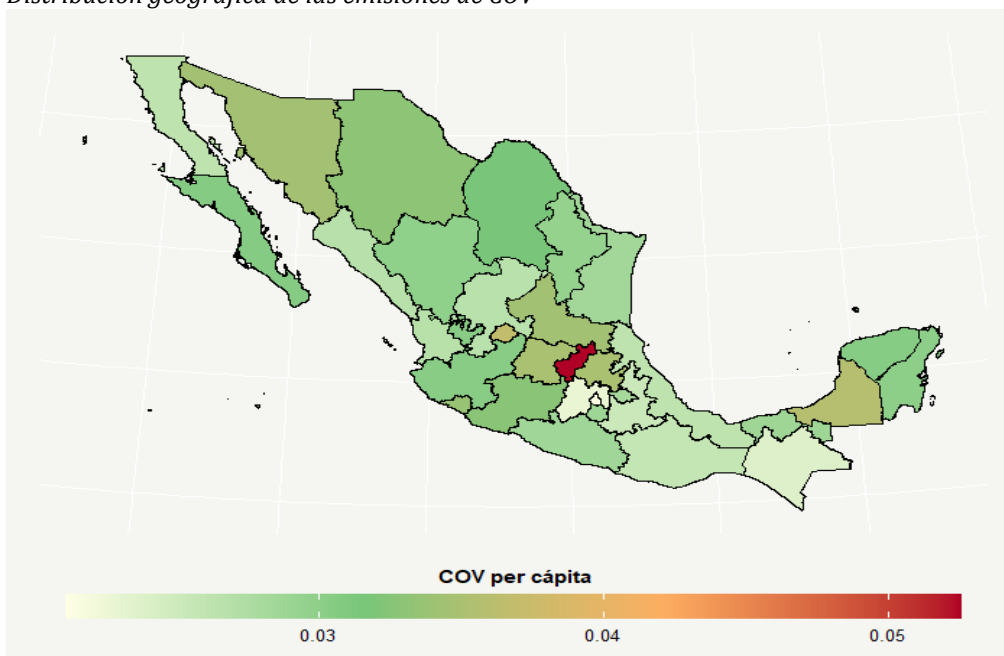
Variables	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	I de Moran
COV	32	0.030280	0.005619	0.021137	0.052498	0.204(0.022**)
PIB	32	151127.8	96874.05	49155.71	558237.8	0.221(0.018**)
PIBs	32	57600.26	80294.03	9880.845	471209.2	0.152(0.062*)
IED	32	4457.066	4098.787	195.3056	16264.7	0.154(0.065*)
DP	32	299.7699	1029.951	11.26821	5881.108	0.51(0.000***)

Nota: Los niveles de significancia están al 10%, 5% y 1% denotados por *, **, ***.

Fuente: Elaboración propia.

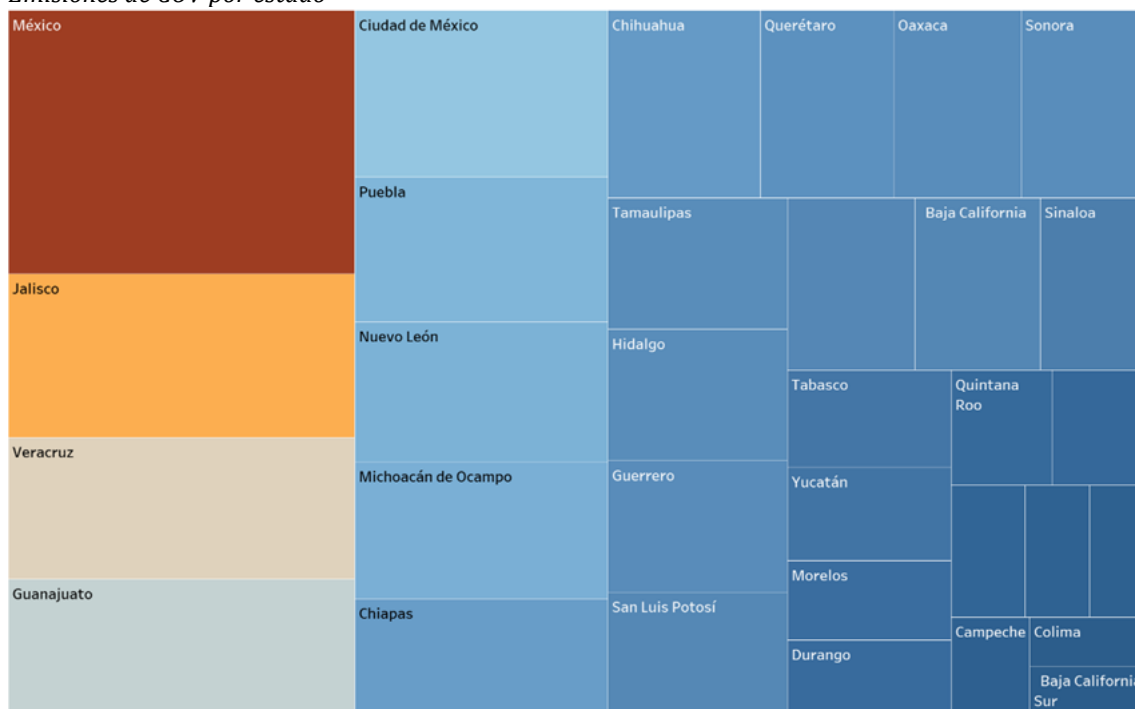
Las variables son transformadas con logaritmo natural para capturar la elasticidad al momento de la estimación del modelo. En la **Tabla 2** se observa que, en todos los casos las variables son significativas en el índice de Moran, es decir se rechaza la hipótesis nula de no dependencia espacial. En la figura 1 se puede observar la distribución espacial de las emisiones de los COV en términos per cápita y en la **Figura 2** se puede observar las emisiones totales de los COV por estado. En el resto de las figuras se muestra la distribución espacial de las variables.

Figura 1
Distribución geográfica de las emisiones de COV



Fuente: Elaboración propia con datos de SEMARNAT (2024).

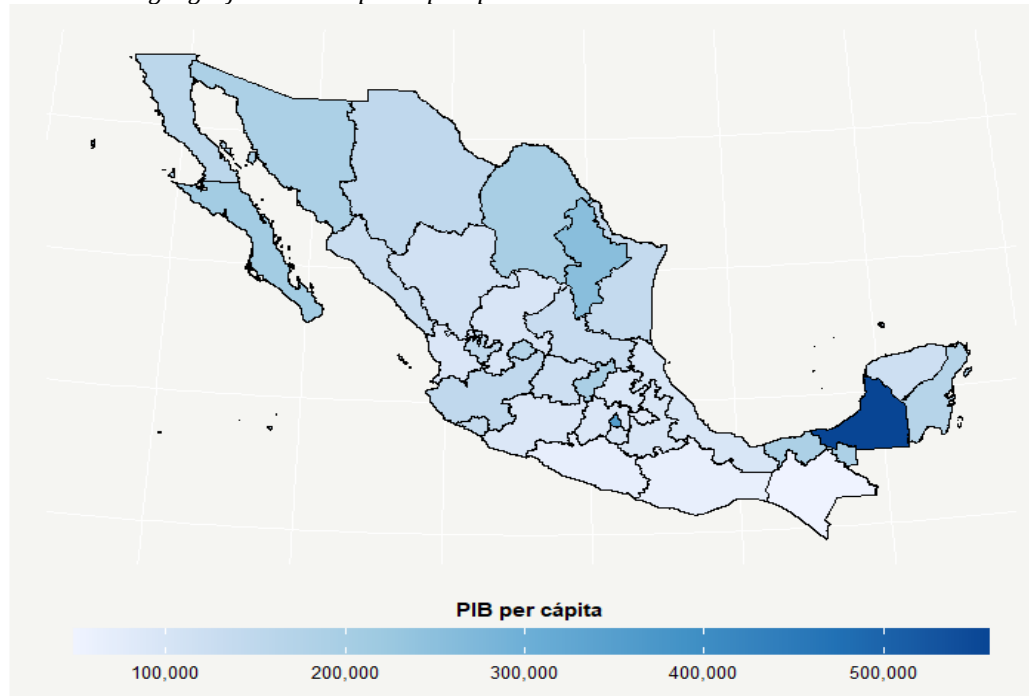
Figura 2
Emisiones de COV por estado



Fuente: Elaboración propia con datos de SEMARNAT (2024).

Figura 3

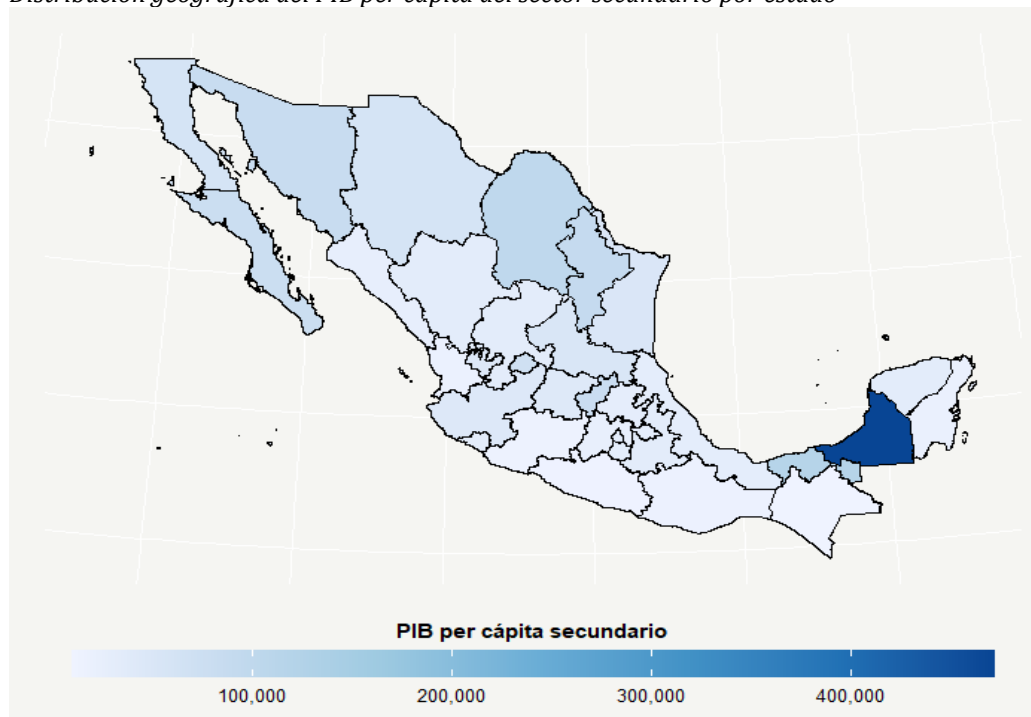
Distribución geográfica del PIB per cápita por estado



Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2022).

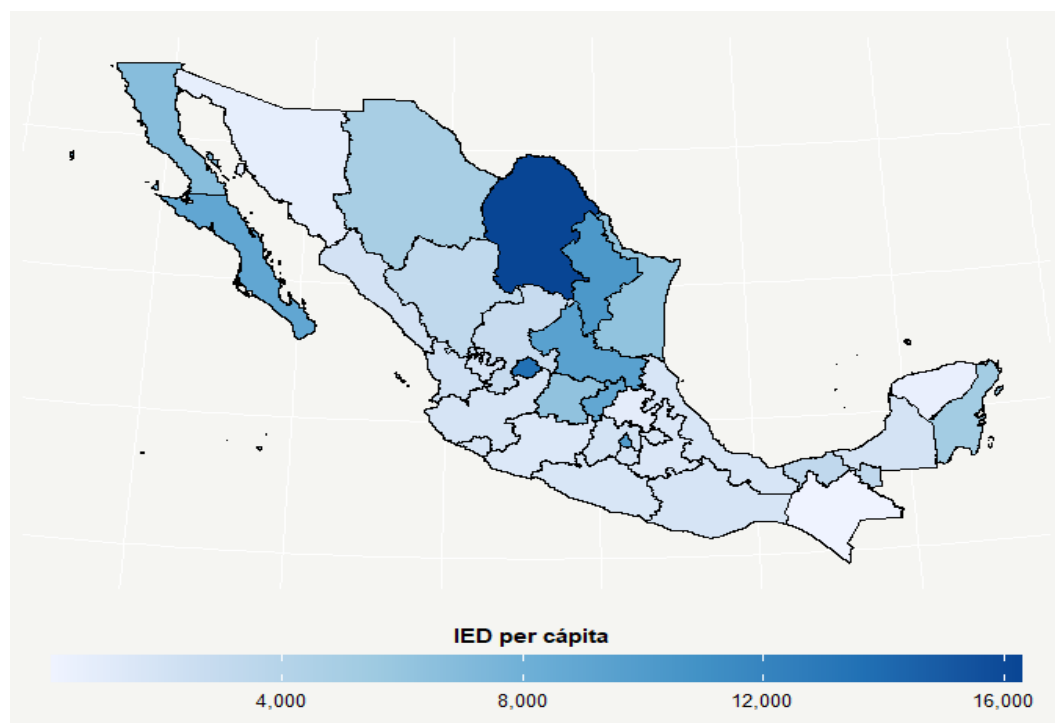
Figura 4

Distribución geográfica del PIB per cápita del sector secundario por estado



Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2022).

Figura 5
Distribución geográfica de la IED per cápita por estado



Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2022).

Con base en el índice de Moran y la dependencia espacial derivada de este, se procede a interpretar las figuras. En la figura 1 se observa que hay estados donde la concentración de emisiones de COV per cápita es mayor, tal como el estado de Querétaro y que a su alrededor existen estados con concentraciones altas de COV como, Hidalgo, San Luis potosí o Guanajuato, así mismo hay estados como Chiapas con menores concentraciones que tienen vecindad de estados con menores concentraciones como Oaxaca o Veracruz, esto va en sentido de lo encontrado en el índice de Moran. Esto contrasta con la figura 2, ya que los estados con mayores emisiones totales no son los mismos que los que emiten más en forma per cápita. Cabe destacar que el estado de México, Jalisco y Veracruz son los estados con mayores emisiones totales, lo que podría estar ligado a efecto escala de la población.

En la figura 3 se observa el caso del PIB per cápita, este de igual manera, muestra que hay relaciones de vecindad, estados como Oaxaca comparten vecindad con Chiapas y Guerrero, todos estos con menor PIB per cápita, y Nuevo León comparte vecindad con Coahuila, ambos con PIB per cápita altos.

En la figura 4 se observa el caso del PIB per cápita secundario. Tabasco y Campeche son los dos estados con mayor PIB per cápita secundario de México y comparten vecindad. Asimismo Coahuila comparte vecindad con Nuevo León y Chihuahua, estados con alto PIB per cápita secundario. En el mismo sentido, en la figura 5 se observa la IED per cápita, la cual muestra la misma relación, estados del norte con vecindad son los estados con mayor IED.

Con base en la disponibilidad de la información, el estado del arte y el interés de estimar la CKA y la HPP, en la ecuación 5 se especifica el modelo a estimar. En la tabla 3 se muestran los resultados de la regresión por MCO del modelo 5.

$$COV_i = \alpha_i + \beta_1 \ln PIB_i + \beta_2 (\ln PIB_i)^2 + \beta_3 (\ln PIB_i)^3 + \beta_4 \ln PIBS_i + \beta_5 IED_i + \beta_6 DP_i + \varepsilon_i \quad (5)$$

Tabla 3*Estimación del modelo 5 por MCO*

Variables	Coefficiente	error estándar	p-valor
Intercepto	-46.997112	190.207843	0.807
$\ln PIB$	9.510442	47.724114	0.844
$\ln PIB^2$	-0.697413	3.983963	0.862
$\ln PIB^3$	0.016546	0.110713	0.882
$\ln PIBS$	0.122109	0.073648	0.11
$\ln IED$	-0.001039	0.039884	0.979
$\ln DP$	-0.017054	0.023587	0.476

Nota: Índice de Moran 1.9718 (0.02432). ** Los niveles de significancia están al 10%, 5% y 1% denotados por *, **, ***.
 Fuente: Elaboración propia.

La evidencia empírica presentada muestra que ningún coeficiente es significativo al 10%. El estadístico estandarizado del índice de Moran y su p-valor rechazan la hipótesis nula, con lo cual se prueba la dependencia espacial entre los estados. No considerar la relación espacial podría explicar por qué los coeficientes no son significativos, esto se debe a que en el modelo MCO al no considerar las relaciones espaciales puede tener problemas de sesgo, inconsistencia e ineficiencia (Anselin, 1998).

Considerando la prueba de Moran y la distribución espacial de las variables, se estima el modelo SDM y las respectivas pruebas para determinar si es el mejor modelo, en la ecuación 6 se presenta la especificación y en la tabla 4 los resultados de la regresión.

$$\begin{aligned} \ln cov_i = & \alpha_i + pWcov_i + \beta_1 \ln PIB_i + \beta_2 (\ln PIB_i)^2 + \beta_3 (\ln PIB_i)^3 + \beta_4 \ln PIBS_i \\ & + \beta_5 IED_i + \beta_6 DP_i + \theta_1 W \ln PIB_i + \theta_2 W (\ln PIB_i)^2 + \theta_3 W (\ln PIB_i)^3 \\ & + \theta_4 W \ln PIBS_i + \theta_5 W IED_i + \theta_6 W DP_i + \varepsilon_i \quad (6) \end{aligned}$$

Tabla 4*Estimación del modelo SDM de la ecuación 6*

Variables	Coefficiente	error estándar	p-valor
Intercepto	-815.256912	348.846581	0.0194388**
$\ln PIB$	-84.943612	36.791448	0.0209554**
$\ln PIB^2$	7.167133	3.070001	0.0195659**
$\ln PIB^3$	-0.201647	0.085312	0.0180968**

$\ln PIBs$	0.226583	0.053001	0.00001911***
$\ln IED$	0.017042	0.027226	0.5313455
$\ln DP$	-0.073945	0.023474	0.001632***
$W * \ln PIB$	284.336521	81.09243	0.0004543***
$W * \ln PIB^2$	-23.411792	6.747195	0.0005207***
$W * \ln PIB^3$	0.641868	0.186789	0.0005897***
$W * \ln PIBs$	-0.218898	0.141297	0.1213342
$W * \ln IED$	-0.10954	0.060208	0.0688584*
$W * \ln DP$	0.092094	0.041956	0.0281618**
ρ	0.51216**		
Wald Test-SAR	1.6227		
Wald Test-SEM	31.077***		
Spatial lag-LR test	20.144***		
Spatial error-LR test	16.288**		
AIC SDM vs AIC LM	-27.218	-23.751	

Nota: Los niveles de significancia están al 10%, 5% y 1% denotados por *, **, ***.

Fuente: elaboración propia.

La evidencia empírica presentada en la tabla 4 muestra que el modelo SDM es apropiado para estimar la dependencia espacial y que es superior a la estimación por SAR o SEM, esto se deriva de la evidencia empírica de las pruebas Wald y las pruebas LR, ya que en ambos modelos se rechaza la hipótesis nula, por lo cual es correcto estimar el modelo SDM tal como lo menciona Elhorst (2014), de igual manera, el criterio AIC indica mejor ajuste por parte del SDM al MCO. ρ es significativo, lo que indica presencia de autocorrelación espacial, es decir, las emisiones de COV están influenciadas por las emisiones de los estados vecinos, esto junto con la prueba de Moran, permite establecer que hay dependencia espacial en las variables de estudio. Dado que ρ es significativa y es diferente de 0, el modelo no puede simplificarse a un SLX, ya que este no captura este término (Halleck Vega y Elhorst, 2015). No se pueden interpretar de manera directa los resultados del modelo SDM, para interpretar los efectos de la dependencia espacial en los propios estados como en su vecindad, se utilizan los efectos directos, indirectos y totales (LeSage, 2008), los cuales se encuentran en la **Tabla 5**.

Tabla 5

Efectos directos, indirectos y totales del modelo SDM

Variables	Efectos directos	Efectos indirectos	Efectos totales
$\ln PIB$	-41.4932534	450.221981**	408.728727*
$\ln PIB^2$	3.60549093	-36.9048632**	-33.299372*
$\ln PIB^3$	-0.10447552	1.0068692**	0.90239373
$\ln PIBs$	0.20802735***	-0.1922727	0.01575465
$\ln IED$	-0.00114609	-0.1884619	-0.18960795
$\ln DP$	-0.0641621***	0.1013651	0.03720293

Nota: Los niveles de significancia están al 10%, 5% y 1% denotados por *, **, ***.

Fuente: Elaboración propia.

La evidencia empírica muestra que en los efectos directos solo la variación de $\ln PIBs$ y $\ln DP$ es significativa, es decir, las variaciones en estas variables impactan en las emisiones de los compuestos orgánicos volátiles en el propio estado, en el caso de $\ln PIBs$ implica que el incremento en 1% de esta variable incrementa las emisiones de COV en 0.208% en el propio estado, caso contrario el de $\ln DP$ ya que el incremento del 1% disminuye las emisiones en 0.064% en el propio estado.

En los efectos indirectos las variables $\ln PIB$, $\ln PIB^2$ y $\ln PIB^3$ son significativas, es decir, las variaciones en los estados vecinos impactan en las emisiones del estado. En específico se observa una relación en forma de “N”.

En los efectos totales, que miden tanto el impacto directo como el indirecto, se muestra que los coeficientes de $\ln PIB$ y $\ln PIB^2$ son significativos, con base en Dinda (2004) y la interpretación de los coeficientes, la evidencia empírica muestra una relación en forma de “U” invertida en los efectos totales, es decir, las emisiones suben hasta un punto de inflexión para después decrecer en el largo plazo. La inversión extranjera, pese a que es significativa en el modelo SDM, no mostró significancia en ninguno de los efectos.

3. Discusión

Considerando los efectos totales, la evidencia empírica es en sentido de la curva de Kuznets ambiental, los resultados van en sentido a lo encontrado por Armeanu *et al.* (2018), ya que de igual manera se comprueba la CKA para COVNM y contrasta con los resultados de Georgiev y Mihaylov (2015) y Maddison (2006). En el caso de México los resultados van en sentido de Kochi y Medina López (2013), ya que la evidencia empírica de igual manera encuentra la CKA para SO_2 , los resultados contrastan con Andrés-Rosales *et al.* (2018), ya que ellos no encuentran evidencia que sustente la CKA para los contaminantes de CO, PM10 y SO_2 .

El PIB secundario muestra incrementos en las emisiones de los COV dentro de los propios estados, esto va en sentido de los resultados de Armeanu *et al.* (2018) y Huang (2018), ya que encuentran que este sector incrementa las emisiones. Para el caso de México, los resultados van acorde a lo encontrado por Kochi y Medina López (2013) y Méndez Delgado *et al.* (2023), ya que las emisiones se incrementan de igual manera por el sector secundario.

En el caso de la IED los resultados contrastan con Cheng *et al.* (2020), Huang *et al.* (2022) y Sapkota y Bastola (2017), ya que encuentran que se cumple la HPP para sus respectivos casos de estudio y también contrasta con Ahmad *et al.* (2021), Huang (2018), Zhang y Zhou (2016), ya que encuentran el halo de contaminación, en el caso de México la evidencia empírica va en sentido a lo encontrado por Kochi y Medina López (2013) para las emisiones totales de SO_2 , ya que las emisiones no son influenciadas por variaciones en la inversión extranjera directa, es decir no se cumple la hipótesis del paraíso contaminante ni la del halo de contaminación para los compuestos orgánicos volátiles en el año 2018 entre los estados de México.

Entre las posibles explicaciones de por qué no es significativa la IED en los efectos totales, se encuentra la dada por Wang *et al.* (2023), ya que explican que en un

mismo país pueden estar ocurriendo la HPP y la hipótesis del halo de contaminación al mismo tiempo, lo que cancela un efecto con el otro.

Finalizando, con la densidad de población, esta tiene efectos propios dentro de los estados, ya que incrementos en esta disminuyen las emisiones de COV. Resultados en el mismo sentido son encontrados por Georgiev y Mihaylov (2015), Huang (2018) y Selden y Song (1994). Por el contrario, Cheng *et al.* (2020) y Sapkota y Bastola (2017). Esto se podría deber a que la densidad de población hace visibles los efectos de la contaminación y afecta a más personas, lo que implica que se atienda el problema en lugares más densamente poblados, porque es más barato y rápido (Sapkota y Bastola, 2017; Selden y Song, 1994).

4. Conclusiones

En el presente trabajo se estudió la relación espacial entre los compuestos orgánicos volátiles y el producto interno bruto, el sector secundario, la inversión extranjera directa y la densidad de población. La evidencia empírica señala que existe la curva de Kuznets ambiental para compuestos orgánicos volátiles en los estados de México para el año 2018. Esto no se puede generalizar para todos los contaminantes ni para todos los años, ya que las variables de estudio son dinámicas.

El sector secundario en la estimación espacial y en la estimación de los efectos totales mostró significancia en el incremento de las emisiones de los compuestos orgánicos volátiles, por lo cual se debe instrumentar una política ambiental enfocada en reducir las emisiones de estos contaminantes. Asimismo, no se puede aceptar la hipótesis del paraíso contaminante y la del halo de contaminación, ya que en todos los modelos la inversión extranjera directa no mostró significancia con las emisiones, esto se podría deber a la existencia del fenómeno de manera desigual entre estados, que en su manera conjunta podrían estar cancelándose.

En el caso de la densidad de población, los resultados señalan que esta ayuda a disminuir las emisiones, esto se podría deber al interés de la sociedad de reducir los impactos en la salud y en el ambiente de las emisiones en las zonas urbanas, ya que ahí se concentra una gran cantidad de población, además de la facilidad de combatir las emisiones en centros urbanos.

Se necesita explorar otros contaminantes, como amoníaco, dióxido de azufre, partículas suspendidas, ozono, entre otros, que usualmente no se estudian en la curva de Kuznets ambiental. Asimismo, se debe estudiar el comportamiento de las emisiones a lo largo del tiempo para estudiar su variación con el paso de este y en otras áreas de estudio, como zonas metropolitanas o ciudades de menor tamaño, para cubrir la brecha en la literatura.

Por parte de la política pública y basado en la evidencia empírica, las entidades federativas deberían tomar en cuenta los efectos de la actividad económica en los estados vecinos para evitar la propagación de la contaminación. Asimismo, aunque la evidencia empírica muestra la no significancia de la inversión extranjera directa en los estados, no se debe aceptar cualquier inversión, ya que podría hacer válida la hipótesis del paraíso contaminante, por contraparte, se debe buscar la inversión extranjera

directa en actividades menos intensivas en contaminación. Dentro de las limitaciones del estadio se encuentra que no se cuenta con una variable explícita de regulación, lo que da pie a explorar de manera profunda el impacto de esta y otras variables.

Referencias

- Ahmad**, M., Jabeen, G., y Wu, Y. (2021). Heterogeneity of pollution haven/halo hypothesis and Environmental Kuznets Curve hypothesis across development levels of Chinese provinces. *Journal of Cleaner Production*, 285, 124898. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124898>
- Andrés-Rosales**, R., Mun, N. K., y Quintana-Romero, L. (2018). El tamaño de las empresas manufactureras y la contaminación medioambiental en México: Una aproximación espacial. *Eure*, 44(131), 75–99. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612018000100075>
- Anselin**, L. (1988). *Spatial Econometrics: Methods and Models* (Vol. 4). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-7799-1>
- Armeanu**, D., Vintilă, G., Andrei, J. V., Gherghina, Ș. C., Drăgoi, M. C., y Teodor, C. (2018). Exploring the link between environmental pollution and economic growth in EU-28 countries: Is there an environmental Kuznets curve? *PLOS ONE*, 13(5), e0195708. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195708>
- Cheng**, Z., Li, L., y Liu, J. (2020). The impact of foreign direct investment on urban PM2.5 pollution in China. *Journal of Environmental Management*, 265, 110532. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110532>
- 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>
- Ding**, L., Wang, L., Fang, X., Diao, B., Xia, H., Zhang, Q., y Hua, Y. (2024). Exploring the spatial effects and influencing mechanism of ozone concentration in the Yangtze River Delta urban agglomerations of China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(7). <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12762-4>
- Dogan**, E., e Inglesi-Lotz, R. (2020). The impact of economic structure to the environmental Kuznets curve (EKC) hypothesis: evidence from European countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(11), 12717–12724. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07878-2>
- Elhorst**, J. P. (2014). Matlab Software for Spatial Panels. *International Regional Science Review*, 37(3), 389–405. <https://doi.org/10.1177/0160017612452429>
- Georgiev**, E., y Mihaylov, E. (2015). Economic growth and the environment: reassessing the environmental Kuznets Curve for air pollution emissions in OECD countries. *Letters in Spatial and Resource Sciences*, 8(1), 29–47. <https://doi.org/10.1007/s12076-014-0114-2>
- Govea Franco**, Á. M., Macías Acosta, R., y González Acol, R. (2024). Inversión extranjera directa y regulación ambiental en las ramas de manufactura y minería en México. *PANORAMA ECONÓMICO*, 19(40), 82–107. <https://doi.org/10.29201/pe-ipn.v19i40.140>

- Grossman**, G. M., y **Krueger**, A. B. (1991). Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement. NBER Working Paper, 3914.
- Halleck** Vega, S., y **Elhorst**, J. P. (2015). THE SLX MODEL. *Journal of Regional Science*, 55(3), 339–363. <https://doi.org/10.1111/jors.12188>
- Huang**, J.-T. (2018). Sulfur dioxide (SO₂) emissions and government spending on environmental protection in China - Evidence from spatial econometric analysis. *Journal of Cleaner Production*, 175, 431–441. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.001>
- Huang**, Y., **Chen**, F., **Wei**, H., **Xiang**, J., **Xu**, Z., y **Akram**, R. (2022). The Impacts of FDI Inflows on Carbon Emissions: Economic Development and Regulatory Quality as Moderators. *Frontiers in Energy Research*, 9(January), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.820596>
- INEGI**. (2022). Subsistema de Información Económica. PIB Por Entidad Federativa (PIBE). Base 2013. <https://www.inegi.org.mx/programas/pibent/2013/#Tabulados>
- Kang**, Y. Q., **Zhao**, T., y **Yang**, Y. Y. (2016). Environmental Kuznets curve for CO₂ emissions in China: A spatial panel data approach. *Ecological Indicators*, 63, 231–239. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.12.011>
- Kochi**, I., y **Medina López**, P. (2013). Más allá de la Curva Ambiental de Kuznets: comprensión de los determinantes de la degradación ambiental en México. *Nóesis. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 22(43–1), 52–83. <https://doi.org/10.20983/noesis.2013.1.2>
- LeSage**, J. P. (2008). An Introduction to Spatial Econometrics. *Revue d'économie Industrielle*, 123(3), 19–44. <https://doi.org/10.4000/rei.3887>
- LeSage**, J., y **Pace**, K. R. (2009). Introduction to Spatial Econometrics.
- Maddison**, D. (2006). Environmental Kuznets curves: A spatial econometric approach. *Journal of Environmental Economics and Management*, 51(2), 218–230. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2005.07.002>
- Mahmood**, H. (2022). Trade, FDI, and CO₂ emissions nexus in Latin America: the spatial analysis in testing the pollution haven and the EKC hypotheses. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(6), 14439–14454. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23154-x>
- Méndez** Delgado, A. V., **Lugo Alvarado**, R., y **Mendoza Tinoco**, D. (2023). La incidencia de la aglomeración urbana en la distribución espacial de emisiones contaminantes del aire. *Estudios Económicos de El Colegio de México*, 38, 69–101. <https://doi.org/10.24201/ee.v38i1.436>
- Mun**, N. K., **Andrés-Rosales**, R., y **Romero**, L. Q. (2016). Crecimiento económico y la contaminación medioambiental en las ciudades mexicanas. *Journal of Iberian and Latin American Research*, 22(1), 31–44. <https://doi.org/10.1080/13260219.2016.1200271>
- OCDE**. (2024). Population density (inhabitants per km²). Dataset: Metropolitan Areas. http://localhost/OECDStat_Metadata/ShowMetadata.ashx?Dataset=CITIESyCoords=%5bVAR%5d.%5bPOP_DEN%5dyShowOnWeb=trueyLang=en
- Sánchez** Montero, J. M., y **Alcántara León**, A. R. (2003). IX. Compuestos orgánicos volátiles en el medio ambiente. In *Scientific Research* (pp. 376–401). <https://core.ac.uk/download/pdf/230313907.pdf>

- Sapkota**, P., y Bastola, U. (2017). Foreign direct investment, income, and environmental pollution in developing countries: Panel data analysis of Latin America. *Energy Economics*, 64, 206–212. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.04.001>
- Secretaría** de Economía. (2024, October 1). Inversión Extranjera Directa. Estadística Oficial de Los Flujos de IED Hacia México. <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/competitividad-y-normatividad-inversion-extranjera-directa?state=published>
- Selden**, T. M., y Song, D. (1994). Environmental Quality and Development: Is There a Kuznets Curve for Air Pollution Emissions? *Journal of Environmental Economics and Management*, 27(2), 147–162. <https://doi.org/10.1006/jeem.1994.1031>
- SEMARNAT**. (2024). Documentos del Inventario Nacional de Emisiones. Datos Definitivos Inventario Nacional de Emisiones de México de Contaminantes
- | Criterio | Año | Base | 2018. |
|---|-----|------|-------|
| https://www.gob.mx/semarnat/documentos/documentos-del-inventario-nacional-de-emisiones | | | |
- SEMARNAT**, y INE. (2005). Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/447321/Guia_Inventario_de_Emisiones.pdf
- Stern**, D. I. (2017). The environmental Kuznets curve after 25 years. *Journal of Bioeconomics*, 19(1), 7–28. <https://doi.org/10.1007/s10818-017-9243-1>
- Tiba**, S., y Belaid, F. (2020). The pollution concern in the era of globalization: Do the contribution of foreign direct investment and trade openness matter? *Energy Economics*, 92, 104966. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104966>
- Wang**, Q., Yang, T., Li, R., y Wang, X. (2023). Reexamining the impact of foreign direct investment on carbon emissions: does per capita GDP matter? *Humanities and Social Sciences Communications*, 10(1), 406. <https://doi.org/10.1057/s41599-023-01895-5>
- Wang**, Y., Zhang, C., Lu, A., Li, L., He, Y., ToJo, J., y Zhu, X. (2017). A disaggregated analysis of the environmental Kuznets curve for industrial CO₂ emissions in China. *Applied Energy*, 190, 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.109>
- Water** Resources Mission Area. (2019). Volatile Organic Compounds (VOCs). <https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/volatile-organic-compounds-vocs>
- Zhang**, C., y Zhou, X. (2016). Does foreign direct investment lead to lower CO₂ emissions? Evidence from a regional analysis in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 943–951. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.226>
- Zhou**, X., Zhou, X., Wang, C., y Zhou, H. (2023). Environmental and human health impacts of volatile organic compounds: A perspective review. *Chemosphere*, 313, 137489. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137489>
- Zilio**, M. I. (2012). Curva de Kuznets ambiental: la validez de sus fundamentos en países en desarrollo. *Cuadernos de Economía*, 35(97), 43–54. [https://doi.org/10.1016/S0210-0266\(12\)70022-5](https://doi.org/10.1016/S0210-0266(12)70022-5)