



Estudios Económicos (México, D.F.)

ISSN: 0188-6916

El Colegio de México A.C.

Méndez Delgado, Alba Verónica; Lugo Alvarado, Rafael; Mendoza Tinoco, David
La incidencia de la aglomeración urbana en la distribución espacial de emisiones contaminantes del aire
Estudios Económicos (México, D.F.), vol. 38, núm. 1, 2023, Enero-Junio, pp. 69-101
El Colegio de México A.C.

DOI: <https://doi.org/10.24201/ee.v38i1.436>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=59775364002>

- [Cómo citar el artículo](#)
- [Número completo](#)
- [Más información del artículo](#)
- [Página de la revista en redalyc.org](#)



Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

**LA INCIDENCIA DE LA AGLOMERACIÓN URBANA
EN LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE EMISIONES
CONTAMINANTES DEL AIRE**

**THE INCIDENCE OF URBAN AGGLOMERATION
IN THE SPATIAL DISTRIBUTION OF AIR
POLLUTANT EMISSIONS**

Alba Verónica Méndez Delgado

*Centro de Investigaciones Socioeconómicas, Universidad
Autónoma de Coahuila*

Rafael Lugo Alvarado

*Centro de Investigaciones Socioeconómicas, Universidad
Autónoma de Coahuila*

David Mendoza Tinoco

Facultad de Economía, Universidad Autónoma de Coahuila

Resumen: Las grandes ciudades demandan una enorme cantidad de recursos materiales y energéticos que generan residuos contaminantes al medio ambiente. El objetivo de este artículo es estimar el impacto que factores asociados con la aglomeración urbana tienen en la contaminación del aire en los municipios de México. Primero se analiza si la contaminación presenta un patrón de aglomeración. Después, con un modelo espacial de Durbin, se estima la relación entre contaminación y aglomeración urbana. Los resultados muestran que la densidad del automóvil, el número de empresas y el consumo son los factores de mayor peso en la generación y aglomeración de contaminación del aire.

Abstract: The functioning of large cities demands huge amounts of material and energy resources that generate polluting waste discharged into the environment. The aim of this article is to estimate the impact of factors associated with urban agglomeration on air pollution generation in Mexico's municipalities. First, we analyse whether the pollution presents an agglomeration pattern, and then, with a Durbin Spatial Model, the relationship between pollution and urban agglomeration is estimated. The results show that car density, the number of companies, and private consumption are the factors with the greatest weight in the generation and agglomeration of air pollution.

Clasificación JEL/JEL Classification: Q53, C31, R11

Palabras clave/keywords: contaminación del aire; diseconomías de aglomeración; dependencia espacial; modelo espacial de Durbin

Fecha de recepción: 20 IX 2021 Fecha de aceptación: 17 XI 2021

<https://doi.org/10.24201/ee.v38i1.436>

Estudios Económicos, vol. 38, núm. 1, enero-junio 2023, páginas 69-101

1. Introducción

El avance de la urbanización como fenómeno global se relaciona con mayores niveles de bienestar y productividad, aunque también se asocia al deterioro medioambiental. El funcionamiento de las grandes ciudades demanda una enorme cantidad de recursos materiales y energéticos. Éstos, a través del proceso metabólico social, se transforman en residuos que contaminan tierra, agua y aire.

El tránsito vehicular, la actividad industrial, la incineración de desechos sólidos y la quema de combustibles de uso residencial son los principales responsables de la contaminación del aire (ONU, 2018; IPCC, 2014). Las ciudades producen el 75% de emisiones de dióxido de carbono, y en el 97% de los centros urbanos -de países con ingresos medios y bajos- se respira aire contaminado. En la dinámica demográfica, el 55% de la población mundial reside en áreas urbanas y se espera que esa proporción se eleve a 68% para el año 2050, principalmente en los países en desarrollo. Esto potencialmente agravará los problemas ambientales de los países en desarrollo, como México, en donde la urbanización produce ciudades extensas y dispersas, con infraestructuras saturadas y deficientes (ONU, 2019).

La contaminación del aire en las ciudades es un problema de salud pública, ya que existe una correlación entre el volumen de material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) y las enfermedades en el sistema nervioso, los padecimientos cardíacos, el cáncer de pulmón y las enfermedades respiratorias crónicas (Kampa y Castanas, 2008), lo cual incrementa los gastos de salud y disminuye la productividad laboral por el deterioro en la salud de la fuerza de trabajo, llegando a ocasionar 4.2 millones de muertes prematuras en el mundo al año (OCDE, 2016).

En México, la contaminación del aire en las ciudades es un problema grave debido a que hasta el 43% de la población es urbana y se concentra en zonas metropolitanas, con el 84.5% de la población urbana del país residiendo en 74 zonas metropolitanas a lo largo del territorio nacional (SEDATU-SEGOB, 2018). De acuerdo con el informe de la calidad del aire 2019, las principales ciudades del país agrupadas en áreas metropolitanas¹ mantienen concentraciones en niveles tóxicos de al menos uno de los contaminantes atmosféricos (monóxido de

¹ Monterrey, Zona Metropolitana del Valle de Toluca, Zona Metropolitana del Valle de México, Zona Metropolitana de Guadalajara, Irapuato, Tijuana, Salamanca, Cuernavaca, Puebla, Querétaro, Mexicali, Xalapa, Minatitlán, Poza Rica, Monclova, Pachuca, Tulancingo, León, Saltillo, Chihuahua, Guanajuato, Tepic, San Juan del Río y otras más; de las cuales algunas no cuentan con medición de la calidad del aire (INECC, 2020).

carbono (CO), material particulado de 10 y 2.5 micrómetros (PM_{10} y $PM_{2.5}$)² y ozono (CO_3) (INECC, 2020).

Asimismo, en México se estima que 29 mil muertes prematuras se asocian a la exposición de material particulado (INECC, 2016). La carga económica estimada asciende a 20 mil millones de pesos debido a las PM_{10} y 16 mil millones de pesos debido a las $PM_{2.5}$. Además, las muertes asociadas a contaminación ambiental han crecido en la última década, al pasar de 21.8 muertes por cada 100 mil personas en 2007, a 29.3 en 2019 (IHME, 2021).

En este contexto, se propone determinar la existencia de una correlación espacial en la aglomeración urbana y el nivel de contaminación de aire para los municipios de México. Asimismo, se analiza el peso relativo de diversas variables relacionadas con la urbanización en la presencia de contaminación de aire. El estudio también permitirá conjeturar sobre el estado de desarrollo urbano asociado a la relación entre urbanización y contaminación ambiental, con base en el planteamiento teórico de la Curva Ambiental de Kuznets. Para comparar la evolución del fenómeno se incluyen dos periodos: 2013 y 2016.

Se parte de la posibilidad de que las características de la localización estén vinculadas con la distribución de los contaminantes en el espacio. En Estados Unidos y Europa se han estudiado los efectos del tamaño de las ciudades en su relación con los costos pecuniarios y medioambientales (Glaeser y Kahn, 2010; Kahn, 2010; Combes *et al.*, 2019). Sin embargo, estos análisis no consideran los efectos espaciales entre regiones vecinas, por lo que los estimadores hallados presentarían un sesgo por la autocorrelación de las observaciones. Como alternativa, investigaciones recientes emplean técnicas de econometría espacial para modelar explícitamente la dependencia espacial entre regiones (Li *et al.*, 2014; Fang *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2017).

En este trabajo se consideran de forma explícita las posibles interacciones espaciales de las variables de estudio. Para ello, se utilizan datos a nivel municipal para México, a partir de los cuales se construye una variable representativa de las emisiones asociadas a la contaminación del aire. Se contempla el material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) como sustancias que tienen efectos degenerativos en la salud. También se incluye la generación de CO dado que representa más del

² Este material consiste en partículas finas, compuestas por sulfato, nitratos, amoníaco, cloruro de sodio, carbono negro, polvo mineral y agua. Se originan en procesos industriales, vehículos de combustión interna, plantas generadoras de electricidad, entre otras fuentes.

70% de las emisiones de gases contaminantes en México. Las variables explicativas están relacionadas con la aglomeración urbana: el grado de urbanización, la actividad manufacturera, el comercio, el consumo de combustibles y el número de vehículos en circulación.

Los resultados muestran que la contaminación del aire presenta dependencia espacial. Y constatan que los factores asociados a la aglomeración urbana tienen un efecto positivo sobre el nivel de emisiones de contaminantes en las ciudades.

El resto del documento está organizado de la siguiente manera. La segunda sección contempla la relación de la aglomeración urbana y económica con la contaminación ambiental. La tercera sección analiza los hallazgos en la literatura relacionados a la distribución espacial de la contaminación del aire y se aborda el tema para México. La metodología y los datos se detallan en la cuarta sección. En la quinta sección se presentan los resultados del análisis espacial, que incluye análisis gráfico, estadísticos de autocorrelación espacial I-Moran y las regresiones espaciales. Finalmente, se presentan las conclusiones.

2. De la relación entre aglomeración urbana y económica con la contaminación

La relación entre urbanización, aglomeración, actividad económica y contaminación ha recibido particular atención recientemente, debido al notorio incremento de urbanización de la población en las últimas décadas, pasando de un tercio de la población global en la década de 1960 a cerca de 56% para 2020 (Poumanyvong y Kaneko, 2010; Liang *et al.*, 2019). Aquí, se entiende a la urbanización como la transición de población agrícola a no-agrícola, y de la transformación de la actividad económica basada en la agricultura hacia industrias no agrícolas (Wang, 2018; Chen *et al.*, 2014).

Existe una correlación entre el proceso de urbanización y de la actividad económica, donde mayor actividad económica atrae a población en forma de empleados, empresarios y proveedores de servicios, que van dando paso a estados más avanzados de la urbanización, lo que en algunos casos deviene en aglomeración urbana (Fang *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2020; Arvin *et al.*, 2015; Mendoza-González *et al.*, 2017). A su vez, esta mayor concentración de personas va requiriendo de mayor cantidad y diversidad de bienes y servicios, por lo que aumenta la demanda y se genera un incremento en las actividades y la diversidad de las industrias económicas. Es decir, se generan economías a escala que propician la aglomeración económica

(Henderson, 2003; Wang *et al.*, 2018). La teoría de la aglomeración económica señala al incremento de la concentración de población como uno de sus factores principales (Chen *et al.*, 2014).

Por otro lado, existe una relación directa entre la actividad económica y la contaminación, ya que el proceso productivo y el metabolismo social generan una degradación al medio ambiente a través de dos vías. Por un lado, la extracción de recursos naturales para ser transformados en bienes de consumo que degrada los recursos naturales; y por otro, los residuos de la producción y el consumo que, al no poder ser absorbidos por la naturaleza para reintegrarse a la misma -y ser en muchos casos nocivos para la salud- generan contaminación ambiental (Sun *et al.*, 2019; Grimm *et al.*, 2008; Liang y Yang, 2019).

Sin embargo, la relación entre urbanización y contaminación urbana resulta más compleja. Estudios seminales para determinar la relación entre el crecimiento económico y la degradación ambiental desarrollan la denominada Curva Ambiental de Kuznets (Grossman y Krueger, 1995). Esta sugiere que, en etapas iniciales de desarrollo, el crecimiento económico generará mayores niveles de contaminación; no obstante, esta teoría expone que existe un punto de inflexión en que la relación se invierte, y mayores niveles ingreso generarán mejoras en la calidad ambiental.

Estudios recientes sobre la dinámica en los procesos de urbanización y contaminación encuentran evidencia que confirma la existencia de una relación en forma de *U* invertida, para economías nacionales de diferentes niveles de ingreso per cápita (Henderson, 2003; Sun *et al.*, 2019; Poumanyvong y Kaneko, 2010; Wang *et al.*, 2020; Liang y Yang, 2019).

Lo anterior sugiere la existencia de una relación bidireccional en forma de *U* invertida entre urbanización, aglomeración urbana y económica, y contaminación. Es decir, para estados bajos del desarrollo urbano, los procesos de aglomeración urbana y económica se relacionan con mayores niveles de contaminación. Mientras que, para estados de desarrollo económico elevados, el incremento en el grado de urbanización se relacionará con reducciones en la contaminación ambiental.

Los trabajos de Grossman y Krueger (1995) distinguen entre tres factores que generan cambios en la actividad económica y la contaminación asociada: el efecto tecnología, el efecto escala y el efecto composición. El primero se refiere a la parte del cambio en la contaminación asociada a la introducción de nueva tecnología en los procesos productivos y usualmente tiene un efecto mitigador; es decir, estos cambios generan una reducción en la cantidad de contaminantes

emitidos por unidad de producto, para cada industria. El efecto escala se refiere a los cambios en la contaminación asociados a cambios en la población y su nivel de ingreso; es decir, más población con mayores ingresos incrementa la demanda, lo que a su vez estimula la producción y la contaminación. Finalmente, el efecto composición está asociado a la estructura económica de cada región, donde aquellas que estén basadas en industrias más contaminantes, como las de transformación, generarán mayor contaminación por cada unidad de valor de producción. Mientras que aquellas regiones que hayan transitado hacia el sector terciario, o menos contaminante, generarán menor contaminación por unidad de valor de producción. Típicamente estas últimas se relacionan a las industrias de las comunicaciones o intensivas en conocimiento, por lo que también se asocian a estados más elevados de desarrollo económico (Liobikienė y Butkus, 2019).

La contaminación se presenta entonces como un reto complejo, puesto que las ciudades demandan una enorme cantidad de recursos naturales y energéticos para sostener su funcionamiento por la concentración de la industria. A su vez, este fenómeno retroalimenta el crecimiento de la producción y el consumo que elevan la demanda de energía en viviendas y transporte, y con ello, la consecuente emisión de contaminantes (Cheng, 2016; Glaeser y Kahn, 2010; Hanley *et al.*, 1997), generando concentraciones de contaminantes a una escala que no puede ser asimilada por el ecosistema (Hanley *et al.*, 1997).

Además, en términos económicos, no existen incentivos para que las empresas internalicen los costos por la contaminación (Henderson, 1974); ya que en una economía de mercado las empresas incurren en costos de producción, pero no cubren los costos de sus desechos o emisiones contaminantes.

Henderson (1977) considera que el espacio juega un papel crucial en la contaminación de las ciudades y resalta dos elementos. En primer lugar, la contaminación es consecuencia de la interdependencia espacial entre productores y consumidores. Y segundo, la contaminación se genera en un punto para luego disiparse con la distancia.

3. Evidencia empírica de la relación de la contaminación y la aglomeración económica y urbana

Existe una amplia literatura dedicada al estudio de la distribución espacial de la actividad económica. Estos estudios muestran que las empresas se aglomeran en el espacio debido a la existencia de economías de aglomeración (Ellison y Glaeser, 1997), como la especialización

del mercado de trabajo (Rosenthal y Strange, 2001), los *spillovers* de conocimiento (Moretti, 2004) y la proximidad entre empresas relacionadas verticalmente (Glaeser y Gottlieb, 2009).

Las economías de aglomeración se fortalecen con el tamaño de las ciudades (Combes *et al.*, 2019); en ellas, la productividad y los salarios están correlacionados positivamente con la propia escala urbana y los efectos de sinergia que se dan entre ciudades cercanas (Gong *et al.*, 2019). Al mismo tiempo, el crecimiento de las ciudades sin límite aparente pone en evidencia las desventajas de la concentración. Altas concentraciones de empresas y población profundizan los costos sociales, entre ellos la degradación del medio ambiente (Cho y Choi, 2014). Además de estos factores, se hace necesario incorporar al análisis los efectos espaciales que pueden surgir de la proximidad entre regiones vecinas (Qian *et al.*, 2014).

Estudios recientes incorporan las interacciones espaciales en la determinación de estos fenómenos. Qian *et al.* (2014) realizan estimaciones por medio de un modelo espacial del error (SEM, por sus siglas en inglés) usando datos a nivel municipal en China para indicar que un incremento del 1% del Producto Interno Bruto (PIB) per cápita provocaría un aumento promedio del 0.72% en las emisiones de azufre (SO₂), y un aumento del 1% en la densidad de población resultaría en un aumento promedio de la emisión de SO₂ en un 0.50%.

Por su parte, Fang *et al.* (2015) examinan 289 ciudades en China, usando una regresión ponderada geográficamente. Y observan que la población, la tasa de urbanización, la densidad del automóvil y la proporción de la industria secundaria tienen influencia significativa y negativa sobre la calidad del aire. Al estudiar la incidencia de factores socioeconómicos y naturales sobre la concentración de contaminantes aéreos se ha observado que las áreas más contaminadas se encuentran en aglomeraciones urbanas. Liu *et al.* (2017) encontraron que la urbanización, la población urbana y la industrialización contribuyen de manera significativa al deterioro de la calidad del aire. Mediante un modelo espacial de Durbin (SDM, por sus siglas en inglés) constataron la existencia de *spillovers* originados por el tráfico vehicular. Otros estudios, como el de Poon *et al.* (2006) -basado en un modelo de error espacial (SEM)- y el de Cheng *et al.* (2017) -centrado en un SDM- concluyen que la contaminación del aire tiene efectos de *spillovers* entre regiones vecinas.

Al analizar los factores que contribuyen al crecimiento del material particulado PM_{2.5}, usando un panel espacial dinámico, Cheng *et al.* (2017) observan que la industria secundaria, el carbón como insumo energético, la aglomeración de la población y la densidad del

automóvil explican el aumento en la concentración de estas partículas. Algunos estudios además muestran evidencia a favor de la existencia de *clusters* de contaminación del aire, ya sea que se contemple el SO_2 y la demanda química de oxígeno (Qian *et al.*, 2014; Cheng, 2016), el índice de calidad del aire (Fang *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2017), o el material particulado $\text{PM}_{2.5}$ (Cheng *et al.*, 2017), como variables para medir la contaminación.

Estas investigaciones -que usan modelos de econometría espacial en su análisis- sugieren que dicha técnica incorpora de manera eficiente el sesgo por autocorrelación espacial en las variables y genera resultados insesgados, identificando que la contaminación tiende a concentrarse en el espacio, influenciada por variables socioeconómicas, y a difundirse hacia regiones vecinas.

3.1 Factores relacionados con la contaminación del aire en México

La industrialización, el crecimiento urbano acelerado y desordenado, así como el incremento del parque vehicular, son en gran medida la causa de contaminación del aire en México (Peniche-Camps y Cortez-Huerta, 2020; Lacasaña *et al.*, 1999). Las actividades industriales en general contribuyen a la contaminación atmosférica. Si bien existen actividades cuya generación directa de emisiones es muy baja, pueden estimular la contaminación por medio de los vínculos productivos con otras industrias más contaminantes (Guajardo y Arrambide, 2002). El crecimiento urbano también es señalado como uno de los factores que profundiza los problemas de contaminación, sobre todo en el contexto de México, donde la movilidad de las personas genera un uso intensivo del transporte privado. Los vehículos de combustión interna son el principal responsable de la mayor parte de la contaminación atmosférica, y son una fuente de emisiones de partículas PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ en todas las ciudades del país (Villegas-López, 2005). La relación entre ingreso y contaminación atmosférica relacionada al transporte ha sido estudiada por Pérez-Cirera *et al.* (2018), con dos hallazgos destacables. En primer lugar, hogares con mayores ingresos generan más contaminación de CO y CO_2 , por lo que no se cumple la curva de Kuznets ambiental. En segundo lugar, los individuos de menores ingresos, que utilizan el transporte público, son más vulnerables debido a la mayor exposición a los contaminantes atmosféricos.

Dentro de los pocos estudios que existen sobre las relaciones entre contaminación y aglomeración para México, se encuentra la investigación de Mendoza-González *et al.* (2017), quienes mediante modelos econométricos de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) y espaciales de

rezago y Durbin, encuentran un efecto positivo y significativo entre algunos contaminantes atmosféricos y las defunciones por enfermedades isquémicas y cardiovasculares en la Zona Metropolitana del Valle de México. Comprueban así un efecto significativo por deseconomías de aglomeración, que es el enfoque de referencia de su análisis.

Asimismo, Mendoza-Cota (2003) pone en evidencia una relación positiva entre las economías de especialización y de urbanización para el sector manufacturero en México. Las estimaciones econométricas permiten determinar que la aglomeración urbana se ve significativamente influenciada por el tamaño del mercado de trabajo manufacturero. Por su parte, Mendoza-Cota y Pérez-Cruz (2007) analizan el cambio en la concentración industrial a partir de factores de aglomeración económica y la dinámica en el comercio internacional. Y con el uso de estimaciones econométricas por el método generalizado de momentos (MGM) determinan que hubo una descentralización de la industria manufacturera, indicando la presencia de deseconomías a escala. En este sentido, aunque sólo abordado contextualmente, refieren a la contaminación como una de las fuerzas centrífugas (o deseconomías de escala) que influyen en los niveles de aglomeración económica.

En este artículo se analiza la relación entre diferentes factores asociados a la aglomeración urbana que influyen en la contaminación del aire en los municipios de México, considerando la dimensión espacial del fenómeno; esta tarea se lleva a cabo con el uso de herramientas de análisis y econometría espacial.

4. Metodología

La primera ley de la geografía de Tobler, o el principio de autocorrelación espacial, establece que todas las cosas están relacionadas entre sí, pero las cosas más cercanas en el espacio se encuentran más relacionadas (Anselin, 1988). La autocorrelación espacial mide el grado en que un fenómeno de interés está correlacionado en el espacio (LeSage y Pace, 2009), mientras que la dependencia espacial es la explicación teórica del fenómeno (Vilalta, 2005).

En términos analíticos, para representar los vínculos espaciales se utiliza información de la posición derivada del espacio cartesiano y de contigüidad, así se establece que existe una relación de vecindad si las regiones comparten alguna frontera o si cumplen algún criterio de cercanía (Anselin, 1988).

Las matrices de contigüidad se representan en una matriz binaria, en donde uno indica que existe vecindad y cero indica lo contrario.

Las matrices basadas en la distancia son una función continua de la distancia métrica. Una forma de especificar estas matrices es a través de una función decreciente con la distancia entre las regiones, ponderadas por un parámetro que penaliza el peso a mayor distancia entre las regiones (LeSage y Pace, 2009).

Generalmente, las matrices se estandarizan por filas al dividir todos sus elementos entre el número de vecinos de cada región. La suma de las filas es igual a la unidad ($\sum_j w_{ij} = 1$); de esta forma, se obtienen matrices de ponderadores espaciales (W), que al multiplicarse con el vector de una variable (y) resulta el rezago espacial (W_y), dicho rezago representa una media ponderada de la variable (Anselin, 2001).

Un primer paso para visualizar las relaciones espaciales es mediante mapas temáticos. Para corroborar la presencia de autocorrelación espacial global se aplica la prueba I-Moran, que es la más utilizada en este tipo de análisis (Anselin, 2001; Ord y Getis, 1995):

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{i \neq j}^n w_{ij}} \quad (1)$$

Donde n es el número de regiones, mientras que x_i y x_j son los valores de las regiones i y j , respectivamente. w_{ij} son los elementos de la matriz de ponderadores espaciales (W) y S la desviación estándar de los datos. El I-Moran toma valores en el intervalo $(-1, 1)$; si $I \approx -1$, hay dispersión perfecta; si $I \approx +1$, hay correlación perfecta; y un $I = 0$ indica que el patrón espacial es aleatorio. Se utiliza el estadístico Z para la prueba de hipótesis, que sigue la distribución normal, donde la hipótesis nula indica que no hay autocorrelación espacial.

Los indicadores de asociación espacial local (LISA, por sus siglas en inglés) permiten descomponer el I-Moran global en las aportaciones de cada región y evaluar la asociación espacial local (I-Moran local, I_i) alrededor de una región específica. Esta técnica es apropiada para identificar agrupamientos de fenómenos en el espacio y visualizar *puntos calientes*. Valores altos y positivos del estadístico I_i indican asociación de valores similares; regiones con niveles altos (bajos) de la variable de interés tienen vecinos con niveles altos (bajos) de dicha variable. Mientras tanto, valores negativos indican asociación entre valores disímiles; regiones con niveles altos (bajos) de la variable de interés se rodean de regiones con niveles bajos (altos) de la misma variable.

Cuando existe dependencia espacial no se cumple el supuesto clásico de independencia entre las observaciones de la econometría

tradicional, por lo que es necesario especificar una estructura de dependencia entre las n observaciones de la muestra de datos. Los modelos de regresión espacial se recomiendan cuando los datos exhiben heterogeneidad espacial y/o dependencia espacial (LeSage y Pace, 2009).

Esta investigación utiliza el SDM que contiene rezagos espaciales en la variable dependiente y en las variables explicativas, el cual es empleado para capturar el efecto de *spillovers* entre regiones vecinas (LeSage y Pace, 2009):

$$y = \rho W y + \alpha \iota_n + X\beta + W X \gamma + \varepsilon \quad (2)$$

Donde y es la variable dependiente, X son las variables explicativas y β sus parámetros asociados, W es la matriz de ponderadores espaciales, ρ es el parámetro autorregresivo, γ es el parámetro de rezago espacial de las variables explicativas, ι_n es un vector de unos, y ε son las perturbaciones. Estos modelos estiman la forma en que el promedio de la variable endógena de las regiones vecinas, más un grupo de variables exógenas, inciden en las variaciones de y .

Los coeficientes de una regresión lineal tienen una interpretación directa a través de las derivadas parciales. Gracias a la independencia entre las observaciones, las variaciones de la variable dependiente en la región i son explicadas por las variables exógenas de la propia región, mientras que las variables exógenas de la región j no afectan a y_i . En los modelos de regresión espacial, por otro lado, los coeficientes contemplan información que aportan las variables exógenas de la región misma y de regiones vecinas, y es posible que $\frac{\partial y_i}{\partial x_{jr}} \neq 0$ donde el subíndice r indica que la variable exógena x pertenece a otra región (LeSage y Pace, 2009). Debido a la presencia de efectos endógenos, los parámetros tienen una interpretación diferente a la de una regresión lineal tradicional.

La introducción de rezagos espaciales en las variables explicativas genera un efecto directo, que es el promedio del efecto de cada región en sí misma. El rezago espacial en la variable dependiente implica efectos de retroalimentación, donde un cambio en la observación i ejerce un efecto en la región j , que a su vez influye de regreso en i . También se generan efectos indirectos que miden el promedio en la respuesta de la variable dependiente de cada región ante las variaciones en regiones vecinas (LeSage y Pace, 2009).

Existen diferentes estrategias para elegir el mejor modelo. La propuesta de Anselin (1998) es a través de pruebas de Lagrange. Otros autores recomiendan el modelo SDM sobre los modelos SAR, SEM y SAC (LeSage y Pace, 2009), ya que afirman que la dependencia

espacial en dichos modelos exagera el sesgo por variables omitidas. Además, los efectos indirectos del SDM ajustan mejor los *spillovers* espaciales al considerar efectos endógenos y exógenos de forma simultánea.

4.1 Datos y definición de variables

El análisis considera información a nivel municipal de México para dos períodos. Los datos de la generación de contaminantes liberados a la atmósfera provienen del Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes Criterio de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales para los años 2013 y 2016 (SEMARNAT, 2021).

La variable de interés es una medida agregada y representativa de la contaminación por emisiones liberadas a la atmósfera. Los contaminantes incluidos son el material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) y el CO. Estos contaminantes provienen de actividades antropogénicas y son los más utilizados en el mundo para evaluar la calidad del aire en las ciudades (OMS, 2006).

Las variables consideradas, vinculadas con las características de la aglomeración urbana, se abordan desde las dimensiones demográfica, social, y económica (cuadro 1).³

Cuadro 1
Definición de variables

<i>Dimensión</i>	<i>Acrónimo</i>	<i>Variable</i>	<i>Fuente</i>
Ambiental	<i>log(emis)</i>	Logaritmo de las emisiones atmosféricas (PM _{2.5} , PM ₁₀ y CO)	INEM (2013, 2016) SEMARNAT
Demográfica	<i>GU50</i>	Grado de urbanización	Censo de Población y Vivienda 2010 y Encuesta Intercensal 2015, INEGI

³ Las variables explicativas utilizadas en las estimaciones econométricas tienen un rezago temporal por considerar que los efectos ambientales pueden tomar tiempo en manifestarse.

Cuadro 1
(Continuación)

<i>Dimensión</i>	<i>Acrónimo</i>	<i>Variable</i>	<i>Fuente</i>
Económica	<i>lq_POcomer</i>	Coficiente de localización de la población ocupada en el sector comercio	Censos economicos 2009 y 2014, INEGI
	<i>lq_COcombu</i>	Coficiente de localización del consumo de combustibles, lubricantes y energéticos	
	<i>lq_PBTmanuf</i>	Coficiente de localización del Producto Bruto Total de la manufactura	
Social	<i>log(vehx1000h)</i>	Logaritmo del número de vehículos por cada mil habitantes	Vehículos de motor registrados en circulación, 2010 y 2015, INEGI

Fuente: Elaboración propia.

En la dimensión demográfica se considera el grado de urbanización (*gu*), que es la proporción de la población urbana (poblaciones de más de 50 mil habitantes) respecto a la población total. En la dimensión económica se utilizaron coeficientes de localización de la población ocupada en el sector comercio, el consumo de combustibles, lubricantes y energéticos y del producto bruto total de las manufacturas para aproximar la presión que ejercen las actividades económicas en las emisiones.⁴ Finalmente, se considera que la urbanización

⁴ El coeficiente de localización del sector *i* en el municipio *m* es: $LQ_{im} = \frac{e_{im}}{\frac{e_j}{E_j}}$, donde e_{im} es la variable del sector *i* en el municipio *m*; e_m es el total de

conlleva formas de transporte motorizado para hacer frente a los desplazamientos intra e interurbanos. Esto se incorpora a través de la densidad de automóviles elaborado con el número de vehículos, registrados y en circulación, por cada mil habitantes. Estudios previos (Qian *et al.*, 2014; Fang *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2017) han demostrado que estos factores tienen un impacto significativo en la contaminación del aire.⁵

5. Análisis gráfico-espacial de las emisiones contaminantes al aire

En términos logarítmicos, la distribución espacial de las emisiones de contaminantes del aire para el caso de México se presenta en la gráfica 1.⁶ Los tonos más oscuros indican valores más altos de las emisiones. Esta primera aproximación sugiere que no hay homogeneidad en la distribución espacial de las emisiones contaminantes.

A nivel de entidad federativa se observa una ligera reducción de las emisiones totales en el lapso entre 2013 y 2016; sobre todo para las entidades donde prevalecían altos niveles de contaminación, como Jalisco, Michoacán, Estado de México, Baja California y Nuevo León. Esto no generó un cambio relevante en las zonas que concentran mayores niveles de emisiones.

Para detectar patrones de correlación espacial se aplican pruebas estadísticas. Para ello, es preciso definir una matriz de contigüidad (o proximidad) que represente las relaciones de vecindad entre los municipios. Primero se considera la contigüidad de esferas de influencia (W_{soi}), donde el área de influencia es un círculo cuyo centro es el centroide del polígono y el radio mide la distancia al vecino más cercano. Si el área de influencia de una región se superpone con el

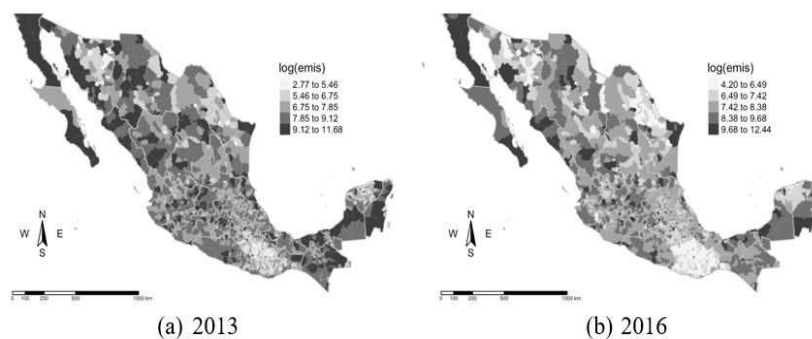
la variable en el municipio m ; E_i es la variable del sector i en el país y E es el total de la variable en el país. Cuando LQ es mayor a uno, hay especialización de la actividad económica en ese municipio. Si LQ es menor a uno, no hay especialización de la actividad económica. Si LQ es igual a uno, la actividad está representada en la misma proporción que en el país.

⁵ Otras variables que se utilizaron en el análisis fueron: el logaritmo de la población total; la densidad poblacional; los coeficientes de localización de la población ocupada en el sector secundario, del consumo de energía, del consumo de agua y de las unidades económicas en el sector manufacturero. Estas variables fueron descartadas debido a que generaban problemas de colinealidad.

⁶ Los mapas y las regresiones fueron procesadas en R y RStudio.

área de influencia de otra región, se consideran vecinos. También se realizaron pruebas con matrices que consideran los vecinos más cercanos utilizando de uno a 50 vecinos (W_k). Por último, se incluye una matriz de distancia inversa con banda máxima al vecino más cercano (W_{inv}).

Gráfica 1
*Emisiones de contaminantes del aire en logaritmos,
2013 y 2016 (cortes naturales)*



Fuente: Elaboración propia con datos de SEMARNAT (2021).

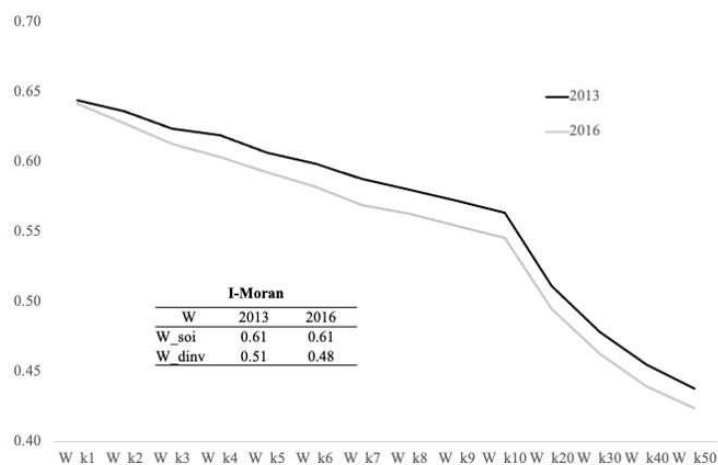
En la gráfica 2 se presentan los resultados del I-Moran para las emisiones de contaminantes del aire (en logaritmos) según las diferentes matrices de ponderadores espaciales (W). La variable $\log(emis)$ presenta dependencia espacial positiva y significativa, lo que sugiere que estas emisiones se encuentran más concentradas en el espacio de lo que se esperaría si se distribuyeran aleatoriamente, para los dos períodos de análisis. Municipios con altos (bajos) niveles de contaminación se encuentran rodeados de municipios con niveles similares. Con la matriz de distancia inversa se confirma la presencia de autocorrelación espacial. En la gráfica 2 se observa que al incrementar el número de vecinos hay una disminución del nivel de autocorrelación y esto se asocia a las características del fenómeno que se está estudiando; es decir, el efecto de las emisiones de contaminantes en el aire tiene un menor impacto en los vecinos más lejanos.

Una primera aproximación para elegir una matriz de ponderadores espaciales es utilizar aquella con mayor nivel de autocorrelación espacial. En el caso de las emisiones, el mayor I-Moran se presenta cuando se considera solo al vecino más cercano (W_{k1}). Para propósitos comparativos se analiza también la vecindad de esferas de

influencia (W_{soi}), la matriz de distancia inversa con banda máxima al vecino más cercano (W_{dinv}) y los nueve vecinos más cercanos (W_{k9}).⁷

Gráfica 2

I-Moran de las emisiones (en logaritmos) según diferentes matrices de ponderadores espaciales (W)



Fuente: Elaboración propia.

Las variables asociadas a la aglomeración urbana presentan coeficientes de autocorrelación espacial (I-Moran) positivos y significativos (cuadro 2). Cuando una región toma valores altos (bajos), de dichas variables, se rodea de regiones con valores altos (bajos) de las mismas. Esta propiedad es más intensa cuando se utiliza W_{k1} y la variable con un mayor nivel de autocorrelación espacial es el grado de urbanización. La variable con menor grado de autocorrelación espacial es el coeficiente de localización del consumo de combustibles, en todos los casos, aunque sigue siendo positiva y significativa.

El I-Moran local permite evaluar la autocorrelación espacial de cada municipio. Éste mide el grado de similitud o diferencia entre el volumen de las emisiones de un municipio en relación con las emisiones de los municipios vecinos. En la gráfica 3 se presentan mapas elaborados a partir del I-Moran local que permiten la identificación

⁷ Al realizar las regresiones con econometría espacial el modelo con mayor AIC es el que utiliza una matriz W_{k9} y es el motivo por el que se incluye para comparar los resultados.

de *puntos calientes*, *puntos fríos* y *outliers* espaciales (Brunsdon y Comber, 2015). Estos últimos se observan en regiones donde existen municipios con niveles bajos (altos) de emisiones rodeados por municipios con niveles altos (bajos).

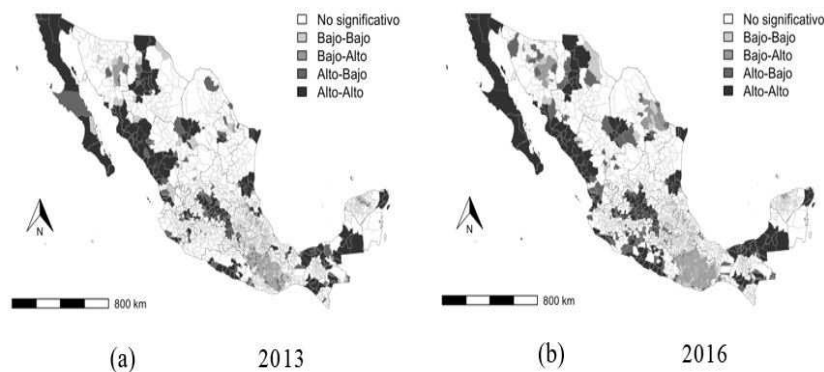
Cuadro 2
I-Moran global de las variables de aglomeración
 urbana con W_{soi} , W_{dinv} , W_{k1} y W_{k9}

Variable	W_{soi}		W_{dinv}	
	2010	2015	2010	2015
<i>GU50</i>	0.29	0.28	0.10	0.10
<i>lq_POcomer</i> <i>lq_COcombu</i> <i>lq_PBTmanuf</i>	2009	2014	2009	2014
	0.26	0.29	0.06	0.07
	0.06	0.04	0.01	0.01
	0.25	0.25	0.09	0.06
<i>log(vehx1000h)</i>	2010	2015	2010	2015
	0.24	0.22	0.24	0.22
Variable	W_{k1}		W_{k9}	
	2010	2015	2010	2015
<i>GU50</i>	0.34	0.33	0.25	0.25
<i>lq_POcomer</i> <i>lq_COcombu</i> <i>lq_PBTmanuf</i>	2009	2014	2009	2014
	0.35	0.35	0.22	0.25
	0.07	0.03	0.05	0.04
	0.27	0.29	0.24	0.22
<i>log(vehx1000h)</i>	2010	2015	2010	2015
	0.24	0.22	0.24	0.22

Nota: En todos los casos el p-valor < 0.001 . Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3

*LISA para las emisiones de contaminantes del aire
(en logaritmos), utilizando W_{k9} ($p < 0.05$)*

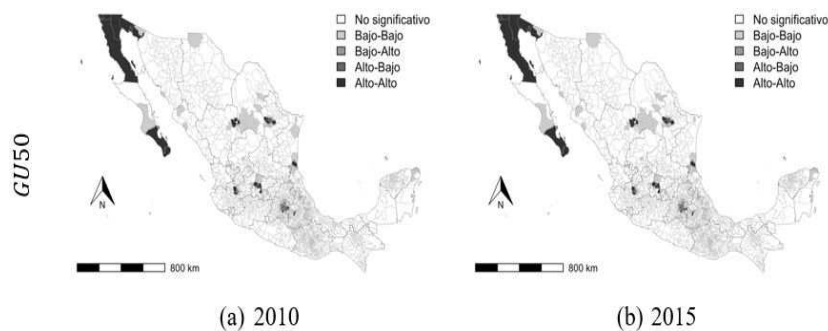


Fuente: Elaboración propia.

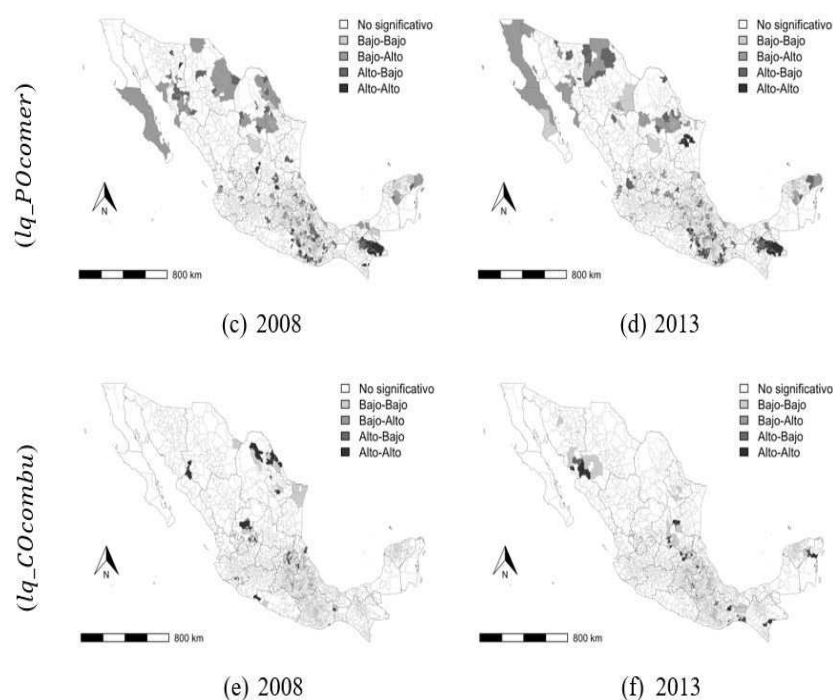
En la gráfica 3, se observa que la concentración puntos calientes corresponden a las principales aglomeraciones urbanas del país; entre ellas, la Ciudad de México, Monterrey, Guadalajara, Tijuana, Toluca, Torreón y León.

Gráfica 4

LISA para el grado de urbanización, los coeficientes de localización de la población ocupada en el sector comercio y del consumo de combustibles, lubricantes y energéticos, utilizando W_{k9} ($p < 0.05$)



Gráfica 4
(Continuación)

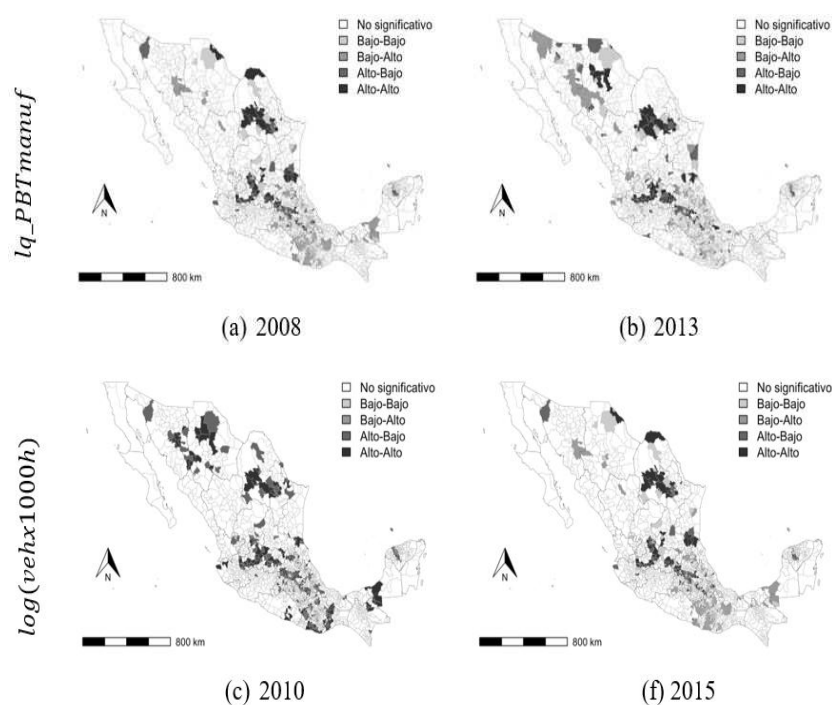


Fuente: Elaboración propia.

El grado de urbanización (gráfica 4) presenta *puntos calientes* en las áreas metropolitanas más importantes del país. Esto nos indica que los municipios que ahí se concentran tienen un grado de urbanización alto, al igual que sus vecinos. El coeficiente de localización (LQ) de la población ocupada en el sector comercio (gráfica 4) indica la presencia de municipios con un bajo LQ rodeadas de municipios con uno alto. El LQ de consumo de combustibles presenta *puntos calientes* dispersos en el territorio nacional (gráfica 4). El LQ del producto total bruto de las manufacturas (gráfica 5) presenta *puntos calientes* en las zonas industrializadas del país, algunas en el norte y una concentración en el centro de México. La variable relacionada con el número de vehículos coincide en los *puntos calientes* respecto a la variable anterior y sobresalen algunos municipios con valores altos rodeados de municipios con valores bajos.

Gráfica 5

LISA para el coeficiente de localización del producto bruto total de las manufacturas y el logaritmo del número de vehículos por cada 1000 habitantes, utilizando W_{k9} ($p < 0.05$)



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados anteriores sugieren que las emisiones contaminantes y las variables explicativas exhiben autocorrelación espacial a nivel global y local. Asimismo, la contaminación tiende a concentrarse en el espacio, formando agrupaciones de municipios con altos niveles de contaminación del aire. Lo siguiente es el uso de econometría espacial para determinar la contribución de cada una de las variables en el fenómeno de contaminación del aire.

5.1 Resultados: estimación de la relación entre la contaminación del aire y los factores de aglomeración urbana

Se busca establecer la incidencia de factores socioeconómicos relacionados con la aglomeración urbana sobre los niveles de contami-

nación del aire ($\log(emis)$). De acuerdo con Anselin (2005) y LeSage (2008) una estrategia para elegir el mejor modelo econométrico es iniciar el análisis con un modelo lineal de MCO. Después, al relajar el supuesto de independencia entre las observaciones, se estiman modelos de regresión espaciales que consideran la autocorrelación espacial.

En el cuadro 3 se presentan los coeficientes de MCO. Con la prueba Breusch-Pagan se detecta la presencia de heterocedasticidad, cuyo origen puede deberse a la presencia de autocorrelación espacial. En la sección anterior, se presentó evidencia de dicha autocorrelación con el estadístico I-Moran. Para ratificar la presencia de autocorrelación espacial en los errores, se aplica el I-Moran a los residuos de MCO. El resultado constata la presencia de dependencia espacial en los errores, dado que el I-Moran resultó positivo y significativo.

Cuadro 3

Relación de la contaminación del aire ($\log(emis)$) y factores de aglomeración urbana. MCO y SDM con W_{k9}

<i>Variables</i>	<i>2013</i>		<i>2016</i>	
	<i>MCO</i>	<i>SDM</i>	<i>MCO</i>	<i>SDM</i>
<i>GU50</i>	2.415*** (0.115)	2.035*** (0.089)	2.273*** (0.091)	2.257*** (0.066)
<i>lq_POcomer</i>	0.200*** (0.055)	0.071 (0.041)	0.089* (0.045)	-0.038 (0.032)
<i>lq_COcombu</i>	0.066** (0.023)	0.026 (0.017)	0.034 (0.020)	0.008 (0.013)
<i>lq_PBTmanu</i>	0.306*** (0.047)	0.250*** (0.036)	0.296*** (0.042)	0.187*** (0.030)
<i>log(vehx1000h)</i>	0.351*** (0.024)	0.222*** (0.027)	0.308*** (0.020)	0.135*** (0.020)
<i>W*GU50</i>	-	-1.187*** (0.178)	-	-1.690*** (0.131)
<i>W*lq_POcomer</i>	-	0.129 (0.087)	-	0.158* (0.066)
<i>W*lq_COcombu</i>	-	0.045 (0.046)	-	0.008 (0.020)

Cuadro 3
(Continuación)

<i>Variables</i>	<i>2013</i>		<i>2016</i>	
	<i>MCO</i>	<i>SDM</i>	<i>MCO</i>	<i>SDM</i>
$W^*lq_PBTmanu$	-	-0.153* (0.072)	-	-0.083 (0.064)
$W^*log(vehx1000h)$	-	-0.173*** (0.036)	-	-0.059* (0.028)
ρ	-	0.789*** (0.016)	-	0.818*** (0.015)
R^2	0.294	0.649	0.357	0.714
AIC	7673.09	6282.925	6541.804	4914.466
LL	-3829.545	-3128.463	-3263.902	-2444.233

Notas: ***p < 0.001; **p < 0.01; *p < 0.05. Errores estándar entre paréntesis.

Fuente: Elaboración propia.

En el cuadro 3 se presentan los resultados de los modelos SDM y MCO, utilizando la matriz de ponderadores espaciales con los nueve vecinos más cercanos (W_{k9}).⁸ El coeficiente autorregresivo (ρ) indica el grado de relación entre las emisiones de una región y las emisiones de sus regiones vecinas; éste es estadísticamente diferente de cero en los dos períodos y oscila alrededor del 80%.

Para la interpretación de los coeficientes es necesario estimar los efectos promedio directos, indirectos y totales. En el cuadro 4 se presentan los resultados utilizando la matriz de ponderadores W_{k9} . El grado de urbanización presenta efectos positivos y significativos para el año 2013 y para 2016 sólo el efecto indirecto no es significativo. Al incrementarse el $GU50$ de la región i en 1% aumentan sus emisiones en 2.1% en 2013, efecto cercano al que se presenta en 2016.

⁸ Una vez descartado el MCO, se realizaron regresiones con los modelos SAR, SEM, SAC y SLX. Las pruebas de Lagrange no fueron concluyentes. Para elegir entre las regresiones con diferentes matrices de ponderadores espaciales se tomaron en cuenta el AIC y el LL. En todos los casos, el modelo que presentó menor AIC y mayor LL fue el modelo SDM, que utiliza W_{k9} ; lo anterior nos indica que es el modelo con mejor ajuste.

Un aumento del $GU50$ de las regiones vecinas de la región i aumenta en 1.9% la contaminación del aire de la región i . El efecto promedio total se reduce entre 2013 y 2016, mientras que el efecto directo se incrementa, lo que indica que el grado de urbanización de la región i genera mayores niveles de contaminación dentro de dicha región. Este resultado refleja la relación entre el crecimiento de la concentración poblacional en zonas urbanas y mayores niveles de emisiones de contaminantes.

Cuadro 4

Relación de los contaminantes del aire ($\log(emis)$) y factores de aglomeración urbana. SDM: efectos directos, indirectos y totales con W_{k9}

Variables	2013			2016		
	Efectos	Efectos	Efectos	Efectos	Efectos	Efectos
	directos	indirectos	totales	directos	indirectos	totales
$GU50$	2.107*** (0.094)	1.909* (0.741)	4.016*** (0.778)	2.287*** (0.072)	0.825 (0.626)	3.112*** (0.657)
$lq_POcomer$	0.103* (0.046)	0.843* (0.382)	0.946* (0.403)	-0.014 (0.034)	0.675* (0.344)	0.661* (0.360)
$lq_COcombu$	0.038* (0.020)	0.302 (0.204)	0.340 (0.216)	0.011 (0.017)	0.078 (0.135)	0.089 (0.149)
$lq_PBTmanu$	0.257*** (0.039)	0.200 (0.298)	0.458 (0.312)	0.201*** (0.031)	0.374 (0.312)	0.575 (0.325)
$\log(vehx1000h)$	0.222*** (0.026)	0.006 (0.111)	0.228* (0.113)	0.144*** (0.020)	0.269* (0.105)	0.413* (0.108)

Notas: *** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$. Errores estándar entre paréntesis.

Fuente: Elaboración propia.

La dinámica económica del sector comercio puede tener efectos diferenciados sobre las emisiones. Una mayor concentración de comercio acompañada de una menor concentración de industria podría generar un escenario de menor contaminación del aire. En México, durante el año 2013, se detecta una relación positiva del coeficiente

de localización de la población ocupada en el sector comercio y las emisiones de contaminantes en el aire. En 2016, el efecto directo deja de ser estadísticamente diferente de cero. Un incremento de 0.1% en el $lq_POcomer$ de los vecinos de la región i aumenta su contaminación en alrededor de 8.4%.⁹ La presencia de regiones vecinas con especialización en el sector comercio podría deberse a la expulsión de la industria contaminante y generar efectos negativos en la emisión de contaminantes de las regiones que la reciben. El efecto indirecto disminuye ligeramente para 2016 y el mismo comportamiento se presenta para el efecto promedio total. La disminución entre estos dos años podría indicar un tránsito hacia actividades económicas menos contaminantes del aire.

El $lq_combust$ es menor a uno para el 78% de los municipios, mientras que en 28 de ellos oscila entre 10 y 14. Esta distribución del coeficiente de localización del consumo de combustible produce una baja autocorrelación espacial, con un efecto directo significativo en 2013. Un incremento en una unidad del $lq_COcombust$ está asociado al aumento en 3.8% de las emisiones de contaminantes en el aire. El efecto aparentemente es pequeño y se debe a que la mayoría de los municipios no se especializan en esta actividad.

El coeficiente de localización del producto bruto total de las manufacturas pretende identificar los lugares en donde se concentra la industria y su importancia económica. Esta variable solo presenta efectos directos. A mayor $lq_PBTmanuf$ en la región i , mayor el nivel de la contaminación en la misma.¹⁰ El efecto disminuye ligeramente entre 2013 y 2016.

La dimensión social asociada a la aglomeración urbana se mide con el número de vehículos por cada mil habitantes. Los efectos directo y total de esta variable son positivos y significativos. Un incremento de 1% de la densidad vehicular en la región i aumenta en 0.2% las emisiones de contaminantes en el aire en la misma región en 2013, y se observa una ligera reducción de este efecto para 2016. El efecto promedio total presenta un aumento entre estos dos años, lo que se asocia al efecto indirecto que resulta significativo, e indica un aumento en 2.7% de la contaminación en la región i debido a un incremento de 1% en la densidad vehicular de sus vecinos.

⁹ El rango del $lq_POcomer$ se encuentra entre cero y 3.13, con una media de 1.44.

¹⁰ El rango del $lq_PTBmanuf$ se encuentra entre cero y 2.3, con una media de 0.49. El 75% de los municipios tienen un LQ menor a uno, no hay especialización en este sector.

En el cuadro A.2 del apéndice se presentan los efectos directos, indirectos y totales del SDM, utilizando las matrices de ponderadores W_{soi} , W_{dinv} y W_{k1} . Los efectos indirectos muestran en mayor medida una diferencia respecto a los presentados en el cuadro 4; esto se debe a que las matrices alternativas consideran diferente número de vecinos, lo cual afecta el tamaño del impacto. Aún con esta diferencia, en la mayoría de los casos el cambio no es grande, confirmando los efectos descritos con anterioridad.

6. Conclusiones

La contaminación del aire, vinculada a la aglomeración urbana, es uno de los problemas más graves que padecen las ciudades alrededor del mundo, por los riesgos que representa para la salud humana, la calidad de vida de sus habitantes y la productividad de la fuerza laboral.

En esta investigación, el análisis espacial brinda evidencia de la concentración regional de la contaminación. A través del estadístico I-Moran, se determina que las emisiones están espacialmente autocorrelacionadas a nivel global y local. La identificación de *clusters* o *puntos calientes* reveló que la contaminación del aire se concentra en las principales aglomeraciones urbanas del país. Las mayores aglomeraciones espaciales de contaminación aérea se encuentran en las zonas metropolitanas de la Ciudad de México, Monterrey, Guadalajara, Tijuana, Mexicali, La Laguna, Aguascalientes, León, Querétaro y Toluca. Asimismo, el análisis gráfico permite identificar corredores regionales de contaminación.

El análisis econométrico mediante el SDM muestra que el grado de urbanización y los coeficientes de localización de la población ocupada en el sector comercio, del consumo de combustibles y del producto bruto manufacturero, junto con la densidad vehicular, tienen una influencia positiva y significativa sobre la contaminación a nivel local (efecto directo).

Los resultados concuerdan con estudios anteriores, en donde la densidad del automóvil y el grado de urbanización impactan positivamente en las emisiones contaminantes del aire (Qian *et al.*, 2014; Cheng *et al.*, 2017). A diferencia de los estudios de Qian *et al.* (2014) y Fang *et al.* (2015), donde únicamente se mide la influencia del sector secundario, en este trabajo se incluye la incidencia de las actividades económicas instaladas pertenecientes al sector comercio. Esta variable permite establecer el impacto diferenciado en la contaminación del

aire por tipo de industria, sugiriendo que el tránsito de la industria manufacturera hacia el sector terciario tiene un efecto reductor de la contaminación del aire, lo cual sería un indicio de la existencia de la Curva de Kuznets ambiental.

Por otro lado, la autocorrelación espacial indica que la contaminación de un lugar está condicionada en cierta medida por la de sus vecinos. En consecuencia, se requiere de coordinación y correspondencia entre las acciones de los gobiernos nacionales y subnacionales responsables de reducir la contaminación.

Al respecto, es necesario que los gobiernos locales mejoren sus prácticas de planeación urbana bajo estrategias de sustentabilidad, como las planteadas en el Objetivo 11 de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (CEPAL, 2018), ya que la velocidad del proceso de urbanización sobrepasa la construcción de infraestructura básica y la capacidad de organizar el crecimiento urbano. Adicionalmente, el desarrollo de infraestructura verde puede contribuir a reducir la concentración de contaminantes del aire.

Por otro lado, en esta investigación se determinó que la densidad de los vehículos privados tiene un impacto significativo en la contaminación del aire. Por tal razón, debería contemplarse la construcción de infraestructura pública que favorezca al transporte colectivo eficiente; así como también, la promoción del uso de medios de transporte alternativos que no utilicen combustibles fósiles, o la movilidad no motorizada.

Las actividades secundarias contribuyen de manera significativa a la contaminación, por lo que la transferencia de fábricas y otras instalaciones industriales fuera de la ciudad no tendrán un impacto en la disminución de la generación de contaminantes si no se acompaña con la incorporación de tecnologías más eficientes, en términos de emisiones. La relocalización de una fábrica de un municipio a otro, sin mejoras tecnológicas, no contribuirá a la reducción global de las emisiones; únicamente a la reducción de la contaminación en el municipio que expulsa esa instalación.

Referencias

- Anselin, L. 1988. *Spatial Econometrics: Methods and Models*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Anselin, L. 2001. Spatial econometrics, en B. Baltagi (ed.), *A Companion to Theoretical Econometrics*, Oxford, Blackwell Publishing Ltd.
- Anselin, L. 2005. *Exploring Spatial Data with GeoDaTM: A Workbook*, California, Center for Spatially Integrated Social Science.
- Arvin, M.B., R.P. Pradhan y N.R. Norman. 2015. Transportation intensity, urbanization, economic growth, and CO2 emissions in the G-20 countries, *Utilities Policy*, 35: 50-66.
- Brunsdon, C. y L. Comber. 2015. *An Introduction to R for Spatial Analysis and Mapping*, SAGE Publications.
- CEPAL. 2018. *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Una Oportunidad para América Latina y el Caribe*, Santiago, Organización de las Naciones Unidas.
- Chen, M., H. Zhang, W. Liu y W. Zhang. 2014. The global pattern of urbanization and economic growth: Evidence from the last three decades, *Plos One*, 9(8): e103799.
- Cheng, Z. 2016. The spatial correlation and interaction between manufacturing agglomeration and environmental pollution, *Ecological Indicators*, 61(2):1024-1032.
- Cheng, Z., L. Li y J. Liu. 2017. Identifying the spatial effects and driving factors of urban PM2.5 pollution in China, *Ecological Indicators*, 82: 61-75.
- Cho, H.S. y M.J. Choi. 2014. Effects of compact urban development on air pollution: Empirical evidence from Korea, *Sustainability*, 6(9): 5968-5982.
- Combes, P.P., G. Duranton y L. Gobillon. 2019. The costs of agglomeration: House and land prices in french cities, *The Review of Economic Studies*, 86(4): 1556-1589.
- Ellison, G. y E.L. Glaeser. 1997. Geographic concentration in US manufacturing industries: A dartboard approach, *Journal of Political Economy*, 105(5): 889-927.
- Fang, C., H. Liu, G. Li, D. Sun y Z. Miao. 2015. Estimating the impact of urbanization on air quality in China using spatial regression models, *Sustainability*, 7(11): 15570-15592.
- Glaeser, E.L. y J.D. Gottlieb. 2009. The wealth of cities: Agglomeration economies and spatial equilibrium in the United States, *Journal of Economic Literature*, 47(4): 983-1028.
- Glaeser, E.L. y M.E. Kahn. 2010. The greenness of cities: Carbon dioxide emissions and urban development, *Journal of Urban Economics*, 67(3): 404-418.
- Gong, X., J. Gao y X. Liang. 2019. Inter-city spillover and intra-city agglomeration effects among local labour markets in China, IZA Discussion Paper No. 12329.
- Grimm, N.B., D. Foster, P. Groffman, J.M. Grove, C.S. Hopkinson, K.J. Nadelhoffer, D. Pataki y D. Peters. 2008. The changing landscape: Ecosystem responses to urbanization and pollution across climatic and societal gradients, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6(5): 264-272.

- Grossman, G.M. y A.B. Krueger. 1995. Economic growth and the environment, *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2): 353-377.
- Guajardo, R. y J. Arrambide. 2002. Índices de intensidad de contaminación atmosférica: una aplicación para el área metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México, *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 18(4): 179-189.
- Hanley, N., J.F. Shogren y B. White. 1997. *Environmental Economics in Theory and Practice*, Londres, Palgrave Macmillan.
- Henderson, J.V. 1974. The sizes and types of cities, *The American Economic Review*, 64(4): 640-656.
- Henderson, V. 2003. The urbanization process and economic growth: The so-what question, *Journal of Economic Growth*, 8(1): 47-71.
- IHME. 2021. GBD compare, <https://vizhub.healthdata.org/gbd-compare/>.
- INECC. 2016. *Estimación de Impactos en la Salud por Contaminación Atmosférica en la Región Centro del País y Alternativas de Gestión*, México, INEEC.
- INECC. 2020. Informe nacional de calidad del aire 2019, México, <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/Informe2019.pdf>.
- INEGI. 2009. Censos económicos 2009, <https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2009/>.
- INEGI. 2010. Censo de población y vivienda 2010, <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>.
- INEGI. 2014. Censos económicos 2014, <https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2014/>.
- INEGI. 2015. Encuesta intercensal 2015, <https://www.inegi.org.mx/programas/intercensal/2015/>.
- IPCC. 2014. Cambio climático 2014: informe de síntesis, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf.
- Kahn, M.E. 2010. New evidence on trends in the cost of urban agglomeration, en E.L. Glaeser (ed.), *Agglomeration Economics*, Chicago, University of Chicago Press.
- Kampa, M. y E. Castanas. 2008. Human health effects of air pollution, *Environmental Pollution*, 151(2): 362-367.
- Lacasaña, M., C. Aguilar e I. Romieu. 1999. Evolución de la contaminación del aire e impacto de los programas de control en tres megaciudades de América Latina, *Salud Pública de México*, 41: 203-215.
- LeSage, J.P. 2008. An introduction to spatial econometrics, *Revue d'Économie Industrielle*, 3(123): 19-44.
- LeSage, J.P. y R.K. Pace. 2009. *Introduction to Spatial Econometrics*, Florida, CRC Press.
- Li, Q., J. Song, E. Wang, H. Hu, J. Zhang y Y. Wang. 2014. Economic growth and pollutant emissions in China: A spatial econometric analysis, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 28(2): 429-442.
- Liang, L., Z. Wang y J. Li. 2019. The effect of urbanization on environmental pollution in rapidly developing urban agglomerations, *Journal of Cleaner Production*, 237: 117649.

- Liang, W. y M. Yang. 2019. Urbanization, economic growth and environmental pollution: Evidence from China, *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 21: 1-9.
- Liobikienė, G. y M. Butkus. 2019. Scale, composition, and technique effects through which the economic growth, foreign direct investment, urbanization, and trade affect greenhouse gas emissions, *Renewable Energy*, 132: 1310-1322.
- Liu, H., C. Fang, X. Zhang, Z. Wang, C. Bao y F. Li. 2017. The effect of natural and anthropogenic factors on haze pollution in Chinese cities: A spatial econometrics approach, *Journal of Cleaner Production*, 165: 323-333.
- Mendoza-Cota, J.E. 2003. Especialización manufacturera y aglomeración urbana en las grandes ciudades de México, *Economía Sociedad y Territorio*, 4(13): 95-126.
- Mendoza-Cota, J.E. y J.A. Pérez-Cruz. 2007. Aglomeración, encadenamientos industriales y cambios en la localización manufacturera en México, *Economía, Sociedad y Territorio*, 6(23): 655-691.
- Mendoza-González, M.A., A. Mejía-Reyes y L. Quintana-Romero. 2017. Deseconomías de aglomeración, contaminación y sus efectos en la salud de la Zona Metropolitana del Valle de México: un análisis con econometría espacial, *Atlantic Review of Economics*, 2(1): 1-33.
- Moretti, E. 2004. Workers' education, spillovers, and productivity: Evidence from plant-level production functions, *The American Economic Review*, 94(3): 656-690.
- OCDE. 2016. *The Economic Consequences of Outdoor Air Pollution*, París, OECD Publishing.
- Ord, J.K. y A. Getis. 1995. Local spatial autocorrelation statistics: Distributional issues and an application, *Geographical Analysis*, 27(4): 286-306.
- Peniche-Camps, S. y M. Cortez-Huerta. 2020. La costumbre al envenenamiento: el caso de los contaminantes atmosféricos de la ciudad de Guadalajara, México, *Revista de Ciencias Ambientales*, 54(2): 1-19.
- Pérez-Cirera, V., E. Schmelkes, O. López-Corona, F. Carrera, A.P. García-Teruel y G. Teruel. 2018. Ingreso y calidad del aire en ciudades: ¿Existe una curva de Kuznets para las emisiones del transporte en la Zona Metropolitana del Valle de México?, *El Trimestre Económico*, 85(340): 745-764.
- Poon, J.P.H., I. Casas y C. He. 2006. The impact of energy, transport, and trade on air pollution in China, *Eurasian Geography and Economics*, 47(5): 568-584.
- Poumanyong, P. y S. Kaneko. 2010. Does urbanization lead to less energy use and lower CO2 emissions? A cross-country analysis, *Ecological Economics*, 70(2): 434-444.
- Qian, L., J. Song, E. Wang, H. Hu, J. Zhang y Y. Wang. 2014. Economic growth and pollutant emissions in China: A spatial econometric analysis, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 28(2): 429-442.
- Rosenthal, S.S. y W.C. Strange. 2001. The determinants of agglomeration, *Journal of Urban Economics*, 50(2): 191-229.
- SEDATU-SEGOB. 2018. *Sistema Urbano Nacional 2018*, México, Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano - Consejo Nacional de Población.

- SEMARNAT. 2021. Inventario nacional de emisiones de contaminantes criterio, <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-contaminantes-criterio-inem>.
- Sun, J., J. Wang, T. Wang y T. Zhang. 2019. Urbanization, economic growth, and environmental pollution: Partial differential analysis based on the spatial Durbin model, *Management of Environmental Quality*, 30(2): 483-494.
- OMS. 2006. *Air Quality Guidelines: Global Update 2005. Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide, and Sulfur Dioxide*, Copenhagen, Organización Mundial de la Salud.
- ONU. 2018. *The Sustainable Development Goals Report 2018*, Nueva York, Organización de las Naciones Unidas.
- ONU. 2019. *World Urbanization Prospects 2018: Highlights*, Nueva York, Organización de las Naciones Unidas.
- Vilalta, C. 2005. Cómo enseñar autocorrelación espacial, *Economía, Sociedad y Territorio*, 5(18): 323-333.
- Villegas-López, A. 2005. Transporte y medio ambiente, *Economía Informa*, 333: 94-101.
- Wang, Q. 2018. Urbanization and global health: The role of air pollution, *Iranian Journal of Public Health*, 47(11): 1644-1652.
- Wang, S., S. Gao, S. Li y K. Feng. 2020. Strategizing the relation between urbanization and air pollution: Empirical evidence from global countries, *Journal of Cleaner Production*, 243: 118615.
- Wang, S., G. Li y C. Fang. 2018. Urbanization, economic growth, energy consumption, and CO2 emissions: Empirical evidence from countries with different income levels, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(2): 2144-2159.

Apéndice

Cuadro A.1

Relación de la contaminación del aire ($\log(emis)$) y factores de aglomeración urbana. SDM con W_{soi} , W_{dinv} , W_{k1}

Variables	2013			2016		
	W_{soi}	W_{dinv}	W_{k1}	W_{soi}	W_{dinv}	W_{k1}
$GU50$	1.949*** (0.090)	2.172*** (0.097)	2.025*** (0.100)	2.116*** (0.066)	2.178*** (0.071)	2.121*** (0.074)
$lq_POcomer$	0.095* (0.043)	0.106* (0.047)	0.133** (0.047)	-0.049 (0.034)	-0.003 (0.027)	0.007 (0.038)
$lq_COcombu$	0.033* (0.017)	0.042* (0.019)	0.043* (0.019)	0.011 (0.018)	0.013 (0.033)	0.025 (0.019)

Cuadro A.1
(Continuación)

Variables	2013			2016		
	W_{soi}	W_{dinv}	W_{k1}	W_{soi}	W_{dinv}	W_{k1}
$lq_PBTmanu$	0.252*** (0.036)	0.271*** (0.039)	0.277*** (0.039)	0.192*** (0.030)	0.240*** (0.031)	0.209*** (0.032)
$\log(vehx1000h)$	0.215*** (0.027)	0.164*** (0.026)	0.260*** (0.028)	0.120*** (0.018)	0.114*** (0.019)	0.185*** (0.020)
W^*GU50	-0.814*** (0.151)	-0.955* (0.484)	-0.460*** (0.107)	-1.306*** (0.112)	-1.646*** (0.334)	-0.722*** (0.080)
$W^*lq_POcomer$	0.083 (0.075)	0.292 (0.323)	0.081 (0.046)	0.232*** (0.057)	0.155 (0.297)	0.126*** (0.035)
$W^*lq_COcombu$	0.037 (0.029)	0.209 (0.148)	-0.013 (0.017)	0.027 (0.025)	0.066 (0.238)	-0.016 (0.020)
$W^*lq_PBTmanu$	-0.117* (0.059)	-0.417* (0.182)	-0.075 (0.041)	-0.040 (0.063)	-0.326 (0.169)	-0.029 (0.041)
$W^*\log(vehx1000h)$	-0.104** (0.034)	-0.215*** (0.058)	-0.055* (0.027)	-0.007 (0.021)	-0.118 (0.069)	0.018 (0.021)
ρ	0.690*** (0.015)	0.982*** (0.021)	0.421*** (0.014)	0.726*** (0.014)	0.998*** (0.020)	0.464*** (0.014)
R^2	0.647	0.552	0.531	0.718	0.641	0.616
AIC	6417.964	6685.591	6987.622	5023.706	5256.673	5661.029
LL	-3195.982	-3329.796	-3480.811	-2498.853	-2615.337	-2817.515

Notas: ***p < 0.001; **p < 0.01; *p < 0.05. Errores estándar entre paréntesis.

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A.2

Relación de la contaminación del aire ($\log(emis)$) y factores de aglomeración urbana. SDM: efectos directos, indirectos y totales con W_{soi} , W_{dinv} , W_{k1}

Variables	2013			2016		
	Efectos	Efectos	Efectos	Efectos	Efectos	Efectos
	directos	indirectos	totales	directos	indirectos	totales
W_{soi}						
$GU50$	2.080*** (0.095)	1.573*** (0.406)	3.653*** (0.453)	2.179*** (0.075)	0.779* (0.339)	2.958*** (0.380)
$lq_POcomer$	0.132** (0.047)	0.441* (0.214)	0.573* (0.239)	0.004 (0.038)	0.664*** (0.184)	0.668** (0.205)
$lq_COcombu$	0.048* (0.020)	0.178 (0.094)	0.226* (0.107)	0.021 (0.022)	0.118 (0.093)	0.139 (0.110)
$lq_PBTmanu$	0.266*** (0.037)	0.169 (0.173)	0.435* (0.190)	0.219*** (0.035)	0.336 (0.193)	0.555** (0.213)
$\log(vehx1000h)$	0.226*** (0.026)	0.132 (0.069)	0.358*** (0.070)	0.142*** (0.019)	0.271*** (0.054)	0.413*** (0.063)
W_{dinv}						
$GU50$	2.260*** (0.102)	29.035* (10.833)	31.295* (10.861)	2.213*** (0.070)	13.323 (7.820)	15.536 (7.838)
$lq_POcomer$	0.135* (0.059)	9.772 (11.808)	9.907 (11.842)	0.008 (0.040)	4.432 (6.707)	4.440 (6.744)
$lq_COcombu$	0.061** (0.022)	6.423 (4.177)	6.484 (4.190)	0.019 (0.024)	2.311 (4.475)	2.330 (4.464)
$lq_PBTmanu$	0.259*** (0.043)	-4.217 (4.106)	-3.958 (4.118)	0.234*** (0.033)	-2.742 (4.034)	-2.509 (4.044)
$\log(vehx1000h)$	0.159*** (0.027)	-1.742 (1.660)	-1.583 (1.664)	0.114*** (0.017)	-0.216 (1.264)	-0.102 (1.266)

Cuadro A.2
(Continuación)

<i>Variables</i>	<i>2013</i>			<i>2016</i>		
	<i>Efectos</i>	<i>Efectos</i>	<i>Efectos</i>	<i>Efectos</i>	<i>Efectos</i>	<i>Efectos</i>
	<i>directos</i>	<i>indirectos</i>	<i>totales</i>	<i>directos</i>	<i>indirectos</i>	<i>totales</i>
W_{k1}						
<i>GU50</i>	2.124*** (0.105)	0.579*** (0.138)	2.704*** (0.199)	2.199*** (0.079)	0.411*** (0.115)	2.610*** (0.168)
<i>lq_POcomer</i>	0.167** (0.053)	0.202** (0.066)	0.369*** (0.099)	0.046 (0.047)	0.203** (0.064)	0.249* (0.102)
<i>lq_COcombu</i>	0.044* (0.022)	0.007 (0.032)	0.051 (0.047)	0.023 (0.022)	-0.007 (0.037)	0.016 (0.056)
<i>lq_PBTmanu</i>	0.288*** (0.042)	0.061 (0.061)	0.349*** (0.089)	0.229*** (0.037)	0.106 (0.065)	0.335*** (0.093)
<i>log(vehx1000h)</i>	0.274*** (0.027)	0.081** (0.029)	0.355*** (0.038)	0.216*** (0.019)	0.162*** (0.028)	0.378*** (0.034)

Notas: ***p < 0.001; **p < 0.01; *p < 0.05. Errores estándar entre paréntesis.

Fuente: Elaboración propia.