

Deseconomías de aglomeración, contaminación y sus efectos en la salud de la Zona Metropolitana del Valle de México. Un análisis con econometría espacial¹

Miguel Ángel Mendoza-González

mendozag@unam.mx

Profesor-Investigador de la Facultad de Economía de la Universidad
Nacional Autónoma de México (UNAM)

Alberto Mejía-Reyes

alberto.mejia@alumnos.ucn.cl

Estudiante de Doctorado de la Universidad Católica del Norte (UCN), Chile

Luis Quintana-Romero

luquinta@apolo.acatlan.unam.mx

Profesor-Investigador de la FES-Acatlán, UNAM

¹ Los autores agradecen las observaciones y recomendaciones de dos árbitros anónimos. Esta investigación fue financiada por el proyecto PAPIIT IN304017 “Vinculación socioeconómica de las industrias creativas y culturales con el sistema urbano de México”.

Resumen

En esta investigación se analizan, desde la perspectiva de las diseconomías de la aglomeración, los efectos de la contaminación ambiental en la incidencia de enfermedades en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). La econometría de espacial se usa con el fin de comprobar los efectos crecientes de la contaminación del aire sobre la distribución espacial de las defunciones en la ZMVM en 2010. Los resultados obtenidos permiten establecer que existe una relación espacial positiva y significativa de las emisiones de contaminantes PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , CO , NO_x , COT y COV en el número de defunciones en la ZMVM, en especial en enfermedades isquémicas del corazón. Asimismo, la evidencia obtenida muestra que en los infartos agudos de miocardio no existe una relación directa con los contaminantes atmosféricos.

Abstract

In this research are analyzed, from the perspective of the diseconomies of agglomeration, the effects of environmental pollution in related diseases in the Metropolitan Zone of the Valley of Mexico (ZMVM). Spatial econometrics is used to verify the increasing effects of air pollution on the spatial distribution of deaths in the ZMVM in 2010. The results obtained allow to establish that there is a positive and significant spatial relationship of the pollutant emissions PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , CO , NO_x , COT and COV in the number of deaths in the ZMVM, especially in ischemic heart diseases. Also, the evidence obtained shows that in acute myocardial infarctions there is no direct relationship with air pollutants.

Clasificación JEL: C13, D63, E32, Q51, I10.

Palabras clave: diseconomías de aglomeración, externalidades negativas, contaminación del aire, enfermedades por contaminación del aire, análisis exploratorio y econometría espacial

1. Introducción

En las últimas décadas se ha observado un incremento sustancial de la contaminación ambiental a nivel mundial; de acuerdo a la OCDE (2014) el costo por contaminación del aire se estimó en 1.4 trillones de dólares en China y de 0.5 trillones para la India durante 2010. El crecimiento exponencial de la contaminación ambiental se debe principalmente al crecimiento económico, la demanda de energía e hidrocarburos de las ciudades (Wark y Warner, 2012). En la Cuarta Comunicación de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC), las autoridades mexicanas informaron que se generaron 711.6 millones de toneladas de carbono negro, que representaron el 1.5% de las emisiones mundiales en 2006 y que en su mayor proporción fueron producidas en la Zona Metropolitana del Valle de México (Inventario de Emisiones de la ZMVM, Gases de Efecto Invernadero y Carbono Negro, 2010). En el caso de la contaminación del agua relacionada con la industria, localizada principalmente en zonas urbanas y en ciudades, se le debe analizar de acuerdo a su función de su uso, exigencias higiénicas y el grado de avance de la ciencia y tecnología (Jiménez, 2001). En general, se puede establecer que una de las fuentes más importantes de contaminación del agua son las descargas residuales, las cuales en México fueron de 100 a 350 litros promedio diario por habitante durante la década pasada. En dichas descargas se encuentran sustancias de desecho del hogar, desechos pluviales y organismos como helmintos y salmonella, que después se convierten en partículas suspendidas que contaminan el aire.

El tercer tipo de contaminante, también relacionado con la dinámica de las ciudades, son los residuos sólidos generados, entre otras causas, por desechar o tirar en la calle un producto no deseable (Jiménez, 2001). Hace 30 años la cantidad de desechos sólidos era de 0.731 kg por habitante al día en poblaciones menores a cinco mil habitantes, diez años después las cantidades se incrementaron a 0.893 en lugares mayores a 500 mil habitantes. En la Ciudad de México a finales del siglo pasado se generaron cerca de 11 mil toneladas de ese tipo de desechos y en toda la ZMVM esa misma cifra fue de aproximadamente 25 mil toneladas (Inventario de Emisiones Criterio de la ZMVM, 2010). Las implicaciones de estos procesos son múltiples y van de los riesgos de reproducción de los ecosistemas, hasta la propia sobrevivencia de la especie humana. En particular, la contaminación del aire constituye un problema de salud pública debido a los graves efectos que tiene en los seres humanos, al dar lugar a enfermedades respiratorias, vasculares y cardíacas, disminución de la capacidad de la sangre para transportar sustancias nutritivas y

oxígeno, trastornos digestivos, asma, bronquitis, aumento de la frecuencia del cáncer bronquial y enfisema pulmonar (Rodés y Guardia, 1993; Manual Merck, 1997). La contaminación en las ciudades no solo es un factor de riesgo por las enfermedades que puede producir, sino que también llega a provocar altos niveles de mortalidad, lo que económicamente se traduce en pérdidas de capital humano o en gastos millonarios en servicios de salud (Heutel y Ruhm, 2013; Brezzi y Sanchez-Serra, 2014; Drabo, 2013).

El objetivo de este trabajo consiste en analizar, desde una perspectiva de externalidades negativas y deseconomías de aglomeración, la distribución espacial en la Zona Metropolitana del Valle de México de enfermedades relacionadas con la contaminación del aire, sobre todo en grupos vulnerables como los de adultos mayores, niños y recién nacidos. Para identificar los efectos directos e indirectos de la contaminación del aire, en las enfermedades y tasas de defunción de la ZMVM durante 2010, en la presente investigación se utilizan modelos econométricos espaciales. El documento se integra, además de esta introducción, por cinco secciones. En la segunda sección se discuten las economías y deseconomías de urbanización, la contaminación del aire y sus efectos esperados en la salud. En la tercera sección se analizan los diferentes tipos de contaminantes del aire y las enfermedades atribuidas a ellos en la ZMVM. La metodología econométrica espacial utilizada se presenta en la cuarta sección. En el quinto apartado se muestran los resultados de los modelos espaciales estimados. Finalmente, en la última sección se presentan las principales conclusiones del trabajo.

2. Las ciudades, las economías y *deseconomías* de urbanización, la contaminación del aire y sus efectos en la salud.

A partir del marco analítico de las economías de aglomeración es posible establecer que las ciudades ofrecen un gran número de ventajas para sus habitantes: la proximidad a escuelas, comercios y servicios de salud, la localización de numerosas empresas generadoras de empleo, la existencia de producción especializada y un entorno de mayor innovación. Todos ellos son elementos que normalmente contribuyen a mejorar la calidad de vida de los habitantes de la ciudad. La concentración de la actividad económica, propia de los grandes centros urbanos, es una fuente de externalidades económicas, las que propician un mayor crecimiento económico, el aprovechamiento de economías de escala y la innovación. La proximidad entre los agentes económicos facilita los intercambios económicos, la mayor interacción y los encuentros cara a cara, facilitan las negociaciones, la divulgación de información y la concentración de recursos humanos e instituciones (O'Sullivan, 2007; Vázquez, 2005). Cuando lo anterior sucede, las ciudades generan

externalidades positivas, que se reflejan en altos niveles de empleo, mayores ingresos y mejores niveles de vida. Sin embargo, también las ciudades pueden dar lugar a deseconomías de aglomeración; el crecimiento y la concentración en las ciudades alcanza un límite, después del cual aparecen problemas de congestión vehicular y contaminación (Polèse, 1998). Como mencionan Henderson (1974) y Becker y Henderson (2000), sí el tamaño de la ciudad es superior al óptimo existe una pérdida de eficiencia económica, que se manifiesta en mayores costos o externalidades negativas en rentas, salarios, transporte, alimentación, menor calidad de servicios públicos, aumento de las actividades ilícitas, mayor tráfico vehicular y elevados niveles de contaminación. En especial las externalidades negativas provocadas por los altos niveles de contaminación del aire, inciden en la mayor probabilidad de enfermedades relacionadas con la exposición prolongada de sustancias nocivas que circulan en el aire y con ello provocan una pérdida inmediata de bienestar de la población (Spadaro, 2011).

Entre los estudios que analizan la relación entre la contaminación del aire y sus efectos sobre la salud, destaca el trabajo de Drabo (2013) que investiga el papel de la contaminación del aire y de las instituciones en la explicación de los problemas de salud en los países en desarrollo de Asia, América Latina y África. Su conclusión principal establece una relación positiva entre contaminación del aire y la desigualdad de la salud por niveles de ingreso, lo cual se porque las comunidades más ricas tienen una mayor habilidad para prevenir y cuentan con un mejor acceso al sistema de salud, mientras que las comunidades más pobres presentan una mayor exposición a la contaminación y por ello mayores efectos negativos en su salud. Esta desigualdad se reduce cuando existen políticas universales, con una buena distribución de instituciones que mitigan los efectos de la contaminación del aire sobre la salud.

El trabajo de Hansman *et al* (2015), aunque aplicado a la industria pesquera, señala que la contaminación del aire no solamente se genera por el transporte y considera que es la industria la que tiene un papel fundamental directa o indirectamente en la generación y concentración de partículas suspendidas tipo PM_{10} y PM_{25} , óxido de nitrógeno (NO_2) y dióxido de azufre (SO_2). La concentración industrial genera contaminantes debido a que los trabajadores y empleados se tienen que desplazar desde grandes distancias utilizando más tiempo el transporte, con lo cual se incrementan las emisiones perjudiciales del aire. Desde el punto de vista de la relación entre los ciclos económicos y la salud pública, existen básicamente dos posiciones vinculadas a la contaminación ambiental: 1) La primera, establece que en periodos de recesión económica se incrementa la mortalidad y los problemas de salud. Su argumento principal consiste en señalar que los individuos, al perder su fuente laboral, ven reducidos sus ingresos, se mina su disponibilidad de servicios de salud, aumenta su estrés y crecen sus problemas de salud, por lo

que tienden a ser más sensible a los efectos de la contaminación ambiental (Heutel y Ruhm, 2013); 2) La segunda, establece que, durante un boom económico, las condiciones ambientales adversas se agudizan debido a la mayor contaminación ambiental provocada por la expansión de la producción industrial, la generación de empleo y la creciente frecuencia de viajes a las zonas centrales (*commuting*) (Heutel y Ruhm, 2013).

3. La Contaminación y las enfermedades respiratorias en la Zona Metropolitana del Valle de México

3.1 Características generales de la ZMVM

La Zona Metropolitana del Valle de México se conforma por 16 delegaciones de la Ciudad de México, 59 municipios del estado de México y uno del estado de Hidalgo.² Colinda al norte con los estados de Hidalgo y México, al este con Tlaxcala y Puebla y al sur con Morelos. Es la zona metropolitana más grande del país, al albergar más de 20 millones de habitantes (Censos de población de 2010).³ Se integra por diez municipios con una población que va de más de 4 mil a 18 mil habitantes y dos municipios o delegaciones de más de 1 millón de habitantes; se estima que el 18% de la población total del país vive en la ZMVM. Por otro lado, la superficie de la ZMVM es de 7,718 km² lo cual representa el 0.3% del territorio nacional. En lo económico, la ZMVM produce la tercera parte del PIB (33%), pero también demanda 65 m³ de agua por segundo, transitan aproximadamente 5 millones de vehículos, existen más de 5.3 millones de viviendas y se cuenta con aproximadamente 123 mil comercios y servicios (Inventario de Emisiones de la ZMVM, 2010). Durante el 2012 la zona metropolitana registró una Población Económicamente Activa (PEA) de aproximadamente 2.5 millones de trabajadores hombres en promedio. El sector económico de mayor ocupación es el terciario con más de 3 millones de trabajadores. La delegación Miguel Hidalgo concentra el 18.7% del personal ocupado y el 18.6% del valor agregado censal bruto, la

² Acolman, Amecameca, Apaxco, Atenco, Atizapán de Zaragoza, Atlautla, Axapusco, Ayapango, Chalco, Chiautla, Chicoloapan, Chiconcuac, Chimalhuacán, Coacalco de Berriozábal, Cocotitlán, Coyotepec, Cuautitlán, Cuautitlán Izcalli, Ecatepec de Morelos, Ecatingo, Huehuetoca, Hueypoxtla, Huixquilucan, Isidro Fabela, Ixtapaluca, Jaltenco, Jilotzingo, Juchitepec, La Paz, Melchor Ocampo, Naucalpan de Juárez, Nextlalpan, Nezahualcóyotl, Nicolás Romero, Nopaltepec, Otumba, Ozumba, Papalotla, San Martín de las Pirámides, Tecámac, Temamatla, Temascalapa, Tenango del Aire, Teoloyucan, Teotihuacán, Tepetlaoxtoc, Tepetlixpa, Tepetzotlán, Tequixquiac, Texcoco, Tezoyuca, Tlalmanalco, Tlalnepantla de Baz, Tonanitla, Tultepec, Tultitlán, Valle de Chalco Solidaridad, Villa del Carbón, Zumpango y Tizayuca (Hidalgo).

³ En el censo de Población y vivienda se reportó que los cuatro municipios más poblados fueron Iztapalapa, Ecatepec de Morelos, Gustavo A. Madero y Naucalpan de Juárez.

Cuauhtémoc representa el 13% del empleo y el mayor número de unidades económicas se localizan en Iztapalapa (9.1%), Cuauhtémoc (9%) y Ecatepec de Morelos (7.9%).⁴

3.2 Contaminación en la ZMVM

La contaminación en la ZMVM puede tener como causales a las actividades productivas, el crecimiento poblacional, el parque vehicular y las actividades antropogénicas. Entre 1990 y 2000 la tasa de crecimiento poblacional de la ZMVM fue de poco menos del 1.9%, siendo dicha zona casi 5 veces mayor a la de Guadalajara y equivalente a las 14 metrópolis más pobladas en México; en 2010 ya superaba los 20 millones de habitantes (Estadísticas del Medio Ambiente del D. F. y Zona Metropolitana, 2000). Al igual que en muchas ciudades del mundo, gran parte de la contaminación ambiental proviene del transporte y de la concentración de las actividades industriales. En 2010 en la ZMVM el número de vehículos fue superior a los 5 millones y el 80% de uso particular. En la zona se llevan a cabo 22 millones de viajes diarios, de los cuales 6 millones se realizan en automóvil particular, 5 millones de manera colectiva y solo 1 millón en taxi (Inventario de Emisiones, 2010)⁵ además de que la mayoría de ellos tienen como principal destino al corredor donde se concentra la actividad económica.

Los contaminantes del aire que usualmente se analizan son los siguientes: 1) El *dióxido de azufre* (SO_2), que es liberado en muchos procesos de combustión como el carbón, el petróleo, el diésel o el gas natural y que contienen cantidades de compuestos azufrados que al disolverse en el agua forman una solución ácida; 2) El *óxido nítrico* (NO) y el *dióxido de nitrógeno* (NO_2), ambos conocidos como NO_x , se generan por automóviles y plantas de energía y son considerados como agentes tóxicos que producen lluvia ácida e incrementa los efectos nocivos en la capa de ozono; 3) El *monóxido de carbono* (CO) que puede causar la muerte cuando se respira en niveles elevados, se produce por la combustión incompleta de sustancias como el gas o la gasolina, keroseno, carbón, petróleo, tabaco o madera; los vehículos detenidos con el motor encendido lo despiden en grandes cantidades; 4) Los *compuestos orgánicos totales* se originan por gasificación o evaporación de sustancias del petróleo o sustancias orgánicas, son causantes del ozono (O_3) y de partículas suspendidas (PM_{10} , $PM_{2.5}$ y $PM_{0.1}$), que al quemarse se caracterizan por dejar un residuo negro de carbón; existen en estado sólido, líquido o gaseoso. Estos compuestos se conocen como agentes cancerígenos, existen dos tipos: benceno sustancia que sería capaz de producir leucemia

⁴ En total la ZMVM contaba en 2010 con más de 730 mil unidades económicas, lo que representa el 14.2% del total nacional. Asimismo, con más de 4.5 millones de personal ocupado total, lo que representa el 17.1% del agregado nacional. Su producción bruta total de casi 2.7 billones de pesos representa el 24.23% del nacional, y el Valor Agregado Censal Bruto en términos absolutos fue de más de 1.2 billones, lo que significa un 25.4% del nacional.

⁵ El consumo energético del transporte se distribuye de la siguiente manera: 46% de gasolina, gas natural 22%, gas GLP 19%, diésel 12% y diésel industrial 1%.

y 1,3-butadieno; y, 5) Los *compuestos orgánicos volátiles (COV)* se liberan por la quema de combustibles como gasolina, madera, carbón o gas natural, por disolventes, pinturas, productos almacenados en casa y en el lugar de trabajo. En general, producen necrosis en las plantas o menor crecimiento y, en los humanos, cefaleas, irritación del aparato respiratorio y otros daños. Pueden causar irritación ocular y respiratoria, sequedad de la garganta, náuseas y problemas respiratorios y es un agente potencialmente cancerígeno (Biblioteca Médica, 2011).

En el cuadro 1 se presentan las estadísticas de las emisiones de contaminantes por sector y categoría en 2010 para la ZMVM. En el caso de las emisiones de las partículas suspendidas $PM_{2.5}$ se puede notar que son provocadas en su mayoría por *fuentes móviles*⁶, con casi 3 mil toneladas anuales⁷, y PM_{10} por *vialidades sin o con pavimento*, en segundo lugar por la actividad industrial y por fuentes móviles, servicios y comercio; SO_2 se relaciona directamente con el sector industrial; CO y NOx y la mayoría de los otros contaminantes se generan por las fuentes móviles, servicios y comercio, así como por la actividad habitacional.

Cuadro 1: Emisiones de contaminantes por sector y categoría, ZMVM, 2010, ton.

Sector/Categoría	Emisiones (ton/año)							
	PM_{10}	$PM_{2.5}$	SO_2	CO	NOx	COT	COV	NH_3
Industrial	5,721	1,219	7,42	6,324	13,953	169,51	150,933	145
			3			4		
Fuentes Móviles	3,720	2,769	411	1,587,66	169,005	200,01	188,414	4,448
				2		0		
Servicios y comercios	349	298	245	11,441	5,878	44,593	35,557	N/S
Habitacional	905	880	19	4,427	4,274	203,91	164,747	30,237
						3		
Construcción	845	607	N/S	4,746	12,001	1,441	1,381	N/S
Agrícola	2,300	652	8	1,746	4,683	529	491	2,182
Ganadero	112	13	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	4,824
Disposición de residuos	N/A	N/A	N/A	153	N/A	330,55	16,090	N/E
						7		

⁶ Se incluyeron todos los vehículos motorizados que circulan por las vialidades.

⁷ Dentro de este rubro los tractocamiones participan con un 13.1 por ciento en emisiones y los vehículos de carga mayores a 3.8 toneladas, con un 6.2 por ciento de este tipo de partículas suspendidas, (Secretaría del Medio Ambiente, GDF, 2010)

Vialidades sin/con pavimento⁸	17,046	2,615	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Incendios	97	86	9	992	32	78	42	9
Vegetación	N/A	N/A	N/A	N/A	5,026	44,774	44,774	N/A
Erosión eólica del suelo	511	108	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Total	31,606	9,247	8,11	1,617,51	214,852	99,409	602,429	41,845
			5	7				

Fuente: Inventario de Emisiones Criterio de la ZMVM, INECC-SEMARNAT, 2010.

Nota: Partículas suspendidas (PM_{10} , $PM_{2.5}$ y $PM_{0.1}$); dióxido de azufre (SO_2); monóxido de carbono (CO); NO_x son los óxidos nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2); carbono orgánico total (COT); (COV); (NH₃).

En el cuadro 2 se muestra la intensidad con la que varían las emisiones y las actividades en un día típico laboral en la ZMVM. Por ejemplo, las emisiones totales de monóxido de carbono alcanzan en un día las 5,132 toneladas y su generación se acelera entre las 6 y las 9 de mañana cuando se moviliza más la población. De acuerdo al INEGI, entre las 6 y 8 horas del día inician los viajes escolares y laborales siendo ahí cuando se presenta un pico en la generación de las grandes emisiones de contaminantes. Entre las 13 y 14 horas se observa la mayor cantidad de emisiones, lo cual coincide con el horario de salida de escuelas y con la hora de comida de los trabajadores, y finalmente a las 18 horas se observa el otro momento de mayor contaminación, cuando terminan las jornadas laborales (ver cuadro 2).

Cuadro 2: Emisiones promedio horarias de la ZMVM, 2010.

Emisiones (ton/hora)						
Hora	PM10	PM2.5	SO ₂	CO	NO _x	COV
0	0.5	0.2	1.0	5.0	7.6	31.4
2	0.6	0.2	1.0	8.4	11.4	35.9
3	0.6	0.2	1.0	8.8	11.8	36.3
4	0.6	0.2	1.0	9.7	12.8	38.0
5	1.0	0.3	1.3	43.2	49.9	83.0

⁸ Se refiere a calles, avenidas que se encuentran pavimentadas o en terracería y se entiende que las vialidades en terracería emiten las mayores cantidades de partículas contaminantes.

6	2.5	0.8	1.8	171.0	191.1	243.0
7	5.6	1.6	2.7	436.1	483.9	571.0
8	7.3	2.0	3.3	384.9	432.5	549.3
9	5.9	1.6	2.9	257.6	292.1	401.2
10	5.8	1.4	2.7	209.7	239.4	344.3
11	5.6	1.4	2.6	189.4	217.0	321.3
12	6.6	1.6	2.9	275.8	312.4	428.2
13	7.4	1.8	3.0	348.9	393.1	517.9
14	7.6	1.9	3.0	366.5	412.5	540.2
15	6.4	1.6	2.7	277.1	313.6	421.4
16	5.6	1.4	2.5	232.6	264.4	351.1
17	5.8	1.5	2.5	253.0	286.8	372.5
18	6.2	1.5	2.5	376.3	418.5	511.6
19	4.8	1.1	2.1	251.4	280.4	354.2
20	4.3	1.0	1.9	222.3	248.2	315.0
21	2.8	0.7	1.6	150.6	168.7	216.0
22	1.6	0.4	1.3	84.5	95.5	133.1
23	0.8	0.2	1.1	27.9	32.9	61.2
Total/día	103	27	52	5,132	5,778	7,592

Fuente: Inventario de Emisiones, INECC-SEMARNAT, 2010.

No obstante, al panorama anterior, es muy importante señalar que ha habido mejoras debido a la tendencia decreciente de la contaminación en la ZMVM. Esto se explica por la mejora en los combustibles, el uso de gas natural, la modernización de programas como el “Hoy No Circula” y los efectos de la verificación vehicular. Por ejemplo, las emisiones de sustancias como el dióxido de azufre, de plomo y monóxido de carbono se han mantenido por debajo de la norma, pero los óxidos de nitrógeno u ozono aún persisten, aunque mantienen una tendencia a la baja (SEMARNAT, 2010); ver cuadro 3.

Cuadro 3: Reducción de Contaminantes en la ZMVM, 2010

AÑO	PM ₁₀	SO ₂	CO	NO _x	COV
2000	34,956	12,792	3,258,847	163,609	642,592
2006	27,556	12,667	2,237,110	201,174	617,504
2008	27,670	12,193	1,792,031	200,180	623,477
2010	28,201	8,108	1,607,038	197,973	600,605
REDUCCIÓN 2000-2010	-19%	-37%	-51%	+21%	-7%

Fuente: Inventario de Emisiones, INECC-SEMARNAT, 2010.

3.3 Las enfermedades relacionadas con la calidad del aire en la ZMVM

Los diferentes tipos de contaminantes mencionados pueden vincularse a *enfermedades del sistema circulatorio y respiratorio*, que suelen ser causadas por esquemas de cardiopatías isquémicas, isquemia cardíaca, infarto agudo de miocardio, ataque cardíaco o infarto, endocarditis, de ellas las más importante son: 1) El *infarto agudo de miocardio*; se presenta cuando parte del flujo sanguíneo que llega al corazón se ve reducido o interrumpido de forma brusca, por lo que se produce una destrucción del miocardio por falta de oxígeno, lo que lleva a la muerte. Este tipo de infarto se relaciona con un ataque al corazón, es una falta de riego sanguíneo a causa de una obstrucción de una de las arterias coronarias.⁹ El cierre de estas es provocado por la *aterosclerosis*¹⁰ o *embolia*¹¹ que provoca un área de *necrosis*¹² en el miocardio; 2) las *enfermedades cardiovasculares*; se caracterizan por una disfunción en el corazón y en los vasos sanguíneos (arterias y venas), se relacionan intrínsecamente con algunas que se han mencionado, entre ellas la *aterosclerosis*, *cor pulmonale*¹³, cardiopatía reumática e hipertensión sistémica (Diccionario de Medicina, 2006). Se les conoce con nombres alternativos: derrame cerebral, infarto cerebral, hemorragia cerebral, accidente cerebrovascular isquémico, accidente cerebrovascular hemorrágico, ataque cerebral (Biblioteca Médica, 2011).¹⁴ 3) la *bronquitis*; es una inflamación de los bronquios causada por una infección. Se pueden presentar problemas en personas que

⁹ Las arterias coronarias se sitúan sobre el corazón, nacen en el seno aórtico posterior derecho e izquierdo, pasan a lo largo de los lados del surco y se dividen en la arteria interventricular derecha e izquierda y una gran rama marginal, la que abastece a ambos ventrículos, las aurículas y nodos sinoauricular, Diccionario de Medicina, (2006).

¹⁰ Trastorno arterial frecuente, se caracteriza por el depósito de placas amarillentas; con lo que las paredes de los vasos se engrosan y sus luces se estrechan con lo que se reduce la circulación en los órganos y regiones normalmente irritados por la arteria

¹¹ Trastorno circulatorio caracterizado por desplazamiento de émbolos a través del torrente sanguíneo, hasta que se bloquea la luz de un vaso

¹² Muerte de una porción de tejido consecutiva a enfermedad o lesión

¹³ Se refiere al término que denota insuficiencia cardíaca derecha, es usado para describir cambios en la estructura y función del ventrículo derecho.

¹⁴ Consultado el 6 de abril de 2013: <http://www.mhs.net/library/spanish%20hie%20multimedia.html>

padezcan de alguna afección cardíaca o pulmonar y en gente en edad avanzada (Merck, M., 2007). Otra enfermedad, como el *Asma* se caracteriza por el estrechamiento de los bronquios debido al incremento de la reactividad bronquial¹⁵ frente a diversos estímulos que producen inflamación y es irreversible¹⁶; 4) la *Neumonía*; es un proceso inflamatorio del parénquima pulmonar¹⁷ de causa infecciosa, se relaciona con la *bronconeumonía*, que se presenta cuando la inflamación se inicia en las paredes bronquiales y se extiende de manera difusa por el pulmón. Dentro de este tipo, está la *Gripe* (del francés *gripper*, bloquear).¹⁸ Se menciona que esta se debía a la “influenza” de una conjunción desfavorable de los astros o del tiempo frío, lo que se ha mantenido como su sinónimo (Manual de Medicina, 1993).¹⁹; y, 5) el *Cáncer de pulmón*; si bien tiene como principal factor al tabaco, cuenta con otros elementos epidemiológicos que se derivan de la exposición profesional a sustancias con poder cancerígeno, destacando las siguientes: asbestos, arsénico, uranio, níquel, cromo, vinilo y berilio. Otros factores que podrían influir son la raza, aspectos alimenticios, endocrinos y la propia contaminación ambiental (Manual de Medicina, 1993).

4. Metodología econométrica

Para contrastar las hipótesis sobre la relevancia espacial que tienen los contaminantes del aire en la generación de enfermedades o defunciones relativas, a continuación se especifica la metodología econométrica que se utiliza para estimar un conjunto de modelos causales para las 16 delegaciones y los 59 municipios que integran a la ZMVM para el año 2010.

¹⁵ Se puede definir como la respuesta obstructiva de las vías aéreas ante estímulos farmacológicos que contraen el músculo liso de las vías aéreas.

¹⁶ Dentro de las causas se menciona que los bronquios de las personas se estrechan por reacciones a sustancias que producen alergia, como el **polen**, **los ácaros** (polvo de la casa), escamillas de los pelos de animales, humo, el aire frío y el ejercicio (Clínica Dam, 2013).

¹⁷ Es un tejido poco diferenciado, formado por células vivas y relacionadas para diversas funciones. Es un tejido propio de un órgano. En el caso del pulmón es la estructura extratorácicas: cabeza-cuello y abdomen.

¹⁸ Los gérmenes causantes de la infección pulmonar llegan al parénquima pulmonar por cuatro vías; a) inhalación de partículas infecciosas presentes en el aire; b) aspiración del contenido de vías respiratorias superiores; c) contigüidad y d) vía hematógena. La más frecuente es la aspiración de gérmenes que colonizan la nasofaringe. Los microorganismos presentes en las vías respiratorias superiores son los que causarán la mayoría de las neumonías bacterianas (neumococo, *Haemophilus influenzae*, *gérmenes anaerobios*, *Moraxella catarrhalis*). (Manual de Medicina, 1993).

¹⁹ Está conformado por una trama de tejido conectivo que le proporciona un adecuado soporte al resto de las estructuras pulmonares; se distribuye en tres compartimentos: **subpleural**, que se ubica por debajo de la pleura visceral y que penetra en el pulmón a través de los septos interlobulillares (semejante a las cuentas de un collar), **peribroncovascular**, ubicado alrededor de los bronquios y arterias y el **parenquimatoso**, localizado entre las membranas basales del epitelio alveolar y el endotelio capilar.

En la estructura de un modelo clásico las enfermedades o defunciones vinculadas a problemas de contaminación (Y_i) están explicadas por los diferentes contaminantes presentadas en un matriz X_i de variables exógenas y por tanto los β_1 parámetros asociados miden el efecto explicado de los contaminantes a las enfermedades o defunciones vinculadas. De acuerdo a ello, el modelo clásico, que es no espacial y lineal, con i observaciones de delegaciones y municipios para la ZMVM se especifican como en la ecuación 1:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i \quad [1]$$

donde ε_i es el componente aleatorio o término de perturbación. En general, se estimarán ocho modelos de acuerdo a la especificación de las variables de enfermedades o defunciones y la misma cantidad de variables explicativas que especifican los tipos de contaminantes y el índice de marginación, como variable de control de la situación sociodemográfica, que se describen en el cuadro 4.

Cuadro 4: Variables dependientes e independientes

Variables dependientes (Y_i)	Variables independientes (X_i)
Mortalidad por Infarto Agudo de Miocardio, <i>tminfagm</i>	Partículas suspendidas PM_{10} , ton anuales, <i>pm10</i>
Porcentaje de edad del total de defunciones por Infarto Agudo de Miocardio, > 65 años y < 5, <i>infagmpo</i>	Partículas suspendidas $PM_{2.5}$, ton anuales, <i>pm2.5</i>
Mortalidad por Enf. Cerebrovasculares, <i>tmenfcer</i>	Bióxido de Azufre, ton anuales, <i>so2</i>
Porcentaje de edad del total de defunciones por Enf. Cerebrovasculares, > 65 años y < 5, <i>encervpo</i>	Monóxido de Carbono, ton anuales, <i>co</i>
Enfermedades Isquémicas del corazón, <i>tmisqcor</i>	Óxido de Nitrógeno, ton anuales, <i>nox</i>
Porcentaje de edad del total de defunciones por Enf. Isquémicas del corazón, > 65 años y < 5, <i>isqcorpo</i>	Compuestos Orgánicos Totales, ton anuales, <i>cot</i>
Enfermedades Respiratorias, <i>tmenfcer</i>	Compuestos Orgánicos Volátiles, ton anuales, <i>cov</i>
Porcentaje de edad del total de defunciones por Enf. Respiratorias, > 65 años y < 5, <i>enferespo</i>	Índice de marginación, <i>indmarg</i>

Fuente: Elaboración propia

Debido a que la dispersión de los contaminantes en el aire, así como las mismas enfermedades, sobre todo las respiratorias, se comportan espacialmente como un fenómeno epidemiológico, la ecuación (1) se debe modificar para considerar la existencia de la dependencia espacial (Fisher y Getis, 2010; Florax, Folmer y Rey, 2003). Los modelos espaciales o de *econometría espacial*,²⁰ nombrada así por Jean Paelinck, incorporan una serie de características espaciales de información geo-referenciada y modelos de economía espacial (Anselin, 1992; Anselin, 1988).²¹ En estos modelos, la *dependencia espacial* cumple con la primera *Ley de la Geografía* (Tobler, 1970), la cual establece que todo está relacionado en el espacio, pero *la relación es mayor cuando los sitios están más cercanos*²². La *autocorrelación espacial* se refiere a la existencia de una relación funcional entre lo que pueda ocurrir en un punto y otro del espacio (Cliff y Ord, 1973; Paelinck y Klaassen, 1979). La relación puede ser positiva, cuando un fenómeno se presenta en una región y se extiende hacia otras regiones vecinas en el mismo sentido, lo que da lugar a concentración; negativa cuando su efecto en otra región es en sentido inverso, lo que da lugar a relaciones centro-periferia.

La primera opción para especificar un modelo espacial es el de *rezago espacial*, se define como:

$$Y_i = \rho WY_i + \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i \quad [2]$$

Donde ρ es el coeficiente que mide la dependencia espacial autorregresiva de las enfermedades o defunciones vinculadas a problemas de contaminación y W es la matriz de pesos espaciales o de *rezago espacial*, que mide la vecindad contigua o de distancia entre las delegaciones y municipios de la ZMVM. El segundo modelo que se puede utilizar para el análisis es el que sigue un proceso de *error espacial*, que también puede ser expresado en la forma de un modelo *durbin espacial* (Anselin, 1980). El modelo *de error espacial* se describe como el siguiente sistema de ecuaciones:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i$$

²⁰ Aroca (2000) menciona que un grupo de economistas y científicos como Anselin (1988, 1992; Anselin y Florax, 1995 y Rey, 1997, 1999), desarrollaron técnicas para trabajar con datos geo-referenciados y estimar modelos que incorporan correctamente la dimensión espacial.

²¹ La popularidad de esta rama ha venido tomando fuerza en trabajos actuales; ya sea por *econometristas* de origen o por estudiosos de temas afines. La importancia la justifican Anselin y Florax (1995) por tres razones: 1) Interés en la investigación del rol del espacio y su interacción con las Ciencias Sociales, especialmente en la Economía. 2) Disponibilidad de grandes cantidades de datos con observaciones geo-referenciadas de las agencias oficiales de gobiernos; y 3) Desarrollo de tecnologías computacionales eficientes y a bajo costo para el manejo de observaciones como los SIG.

²² Tobler W., (1970), "A computer model simulation of urban growth in the Detroit region". *Economic Geography*, 46(2): 234-240.

$$\varepsilon_i = \lambda W \varepsilon_i + u_i \quad [3]$$

Pero con un poco de algebra matricial, se puede reescribir en un formato conocido como modelo durbin espacial:

$$Y_i = \lambda W Y_i + \beta_0 + \beta_1 X_i + \lambda \beta_1 W X_i + \varepsilon_i \quad [4]$$

En este modelo λ representa el parámetro que mide la dependencia espacial en los errores. Tanto el parámetro ρ como λ de los respectivos modelos de rezago y de error espacial, representan procesos endógenos que se deben estimar por un proceso iterativo de máxima verisimilitud (Fisher y Getis, 2010).

Para poder elegir entre el modelo clásico no espacial y los modelos espaciales (rezago o de error espacial) se utiliza un conjunto de pruebas estadísticas (Anselin, 1999). La prueba más popular para detectar autocorrelación espacial es el Índice I de Moran (1948). Su definición parte de la matriz de contigüidad W que consiste en una matriz cuadrada con número igual de filas y columnas al número de polígonos del mapa geográfico de estudio. Los valores utilizados para representar vecindades son de muchos tipos, sin embargo, la forma más simple es una matriz binaria, por lo que los elementos de W serán igual a 1 si dos polígonos son vecinos y cero en cualquier otro caso. La matriz tiene ceros en su diagonal principal, ya que un polígono no es vecino de sí mismo, se estandariza por filas y la suma de cada fila es uno; esta es la forma más útil de crear los rezagos espaciales (Aroca, 2000). El diagrama de Moran expresa de manera formal la asociación lineal entre dos variables aleatorias independientes representadas por un vector Z de los valores observados y el vector W , que expresa las medias ponderadas espacialmente de las unidades de observación vecinas, llamado el vector espacial. El coeficiente se fundamenta en el modelo de autocovarianza. La proximidad entre “i” y “j” se denota como d_{ij} , y serán elementos de la matriz de distancia W , (Le Gallo, 2003). El Índice de Moran presenta la siguiente expresión:

$$I = \frac{n}{s} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} z_i z_j}{\sum_{i=1}^n (z_i)^2}, \quad i \neq j$$

Donde n son las unidades geográficas de observación, w_{ij} son los elementos de una matriz binaria de contigüidad, s es la suma de todos los elementos de la matriz W y z_i y z_j son los valores

estandarizados de la variable a analizar de la unidad geográfica de observación i y j . La sumatoria de i y j compara los valores con la media de toda la región estudiada.²³

El I de Moran tiene un valor esperado de no autocorrelación dado por la expresión: $E(I) = \frac{-1}{n-1}$, donde $E(I)$ es el valor esperado; y n es el número de observaciones. Para aceptar o rechazar la hipótesis nula de no dependencia espacial, se utiliza inferencia estadística bajo supuestos de normalidad, distribuciones experimentales como la distribución Monte Carlo, utilizada como método no determinístico para aproximar numéricamente expresiones matemáticas complejas y costosas.

El procedimiento para elegir entre los modelos alternativos, se resume en seis pasos: 1) Estimar el modelo clásico $Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i$ con el método de mínimos cuadrados ordinarios (mco); 2) Probar la hipótesis de la no dependencia espacial con un rezago espacial omitido o con errores autorregresivos espaciales, utilizando LM_ρ (Multiplicadores de Lagrange) o LM_λ ; 3) Si ambas pruebas no son significativas, la estimación del primer paso se utilizará como especificación final. Si es contrario, se continúa con el siguiente paso; 4) Si ambas pruebas son significativas, se estima la mejor especificación; esto es si $LM_\rho > LM_\lambda$, entonces se estima el de rezago espacial utilizando $MLLAG$. En el caso contrario, si $LM_\rho < LM_\lambda$, se estimará el modelo de error espacial utilizando $MLERROR$. En otro caso, se procede al siguiente; 5) Si LM_ρ es significativo, pero LM_λ no lo es, se estima $MLLAG$; y, 6) En otro caso se estima por $MLERROR$.

5. Datos y resultados

Para la medición de los indicadores de las enfermedades o defunciones relativas se utilizaron las tasas de mortalidad, construidas con indicadores del Sistema Nacional de Información en Salud (SINAIS, SSA)²⁴, donde se aplicó un filtro para detectar las enfermedades relacionadas a la contaminación, en especial con las PM_{10} y $PM_{2.5}$. Las tasas de mortalidad se calcularon del total de defunciones, para cada municipio y delegación para 2010, por cada 10 mil habitantes. Las enfermedades que se definieron como variables dependientes se utilizaron como porcentajes de defunciones, considerando que afectarían en una mayor proporción a los individuos mayores de 65 y menores de 5 años. Con este número de variables dependientes se obtuvieron 8 modelos, a las

²³ Esta matriz de pesos espaciales se basa en los vecinos k -más cercanos calculados desde la distancia radial entre centroides regionales.

²⁴ www.sinais.salud.gob.mx/basesdedatos.

variables se les aplicó logaritmo natural para linealizarlas, balancearlas y tener distribuciones normales (Sarel, 1995). Las variables explicativas se obtuvieron a través de una petición directa a la Secretaría del Medio Ambiente (SMA) del Distrito Federal y se refieren a las emisiones por tonelada para 2010 de fuentes móviles por municipio y delegaciones de la ZMVM. Para la cartografía se recurrió al Marco Geoestadístico Municipal versión 2000 del INEGI.²⁵

Debido a la importancia y gravedad de los contaminantes en el ambiente, el análisis se efectuó considerando a todos los contaminantes, pero con especial énfasis en las partículas suspendidas $PM_{2.5}$ y PM_{10} , las cuales se identifican como átomos en el aire que no pueden ser vistos y existen en cualquier forma y tamaño, pueden ser sólidas o líquidas y se dividen en dos grupos: grandes, las PM_{10} y pequeñas, las $PM_{2.5}$. Las grandes se miden de 2.5 a 10 micrómetros (25 a 100 veces más delgadas que un cabello humano), estas partículas causan efectos menos severos en la salud. Las pequeñas son menores a 2.5 micrómetros (100 veces más delgadas que un cabello)²⁶. De acuerdo al daño en la salud, las $PM_{2.5}$ pasan a través de las vías respiratorias, pero las PM_{10} tienen más posibilidades de adherirse a las paredes, o acunarse en los pasajes estrechos de los pulmones. Otros factores que afectarían son respirar por la boca, el ejercicio y la edad.²⁷

5.1 Análisis exploratorio espacial

Para el análisis exploratorio de los indicadores de enfermedades y defunciones relativas, nos enfocamos en la población en general y la población vulnerable de menos de 5 y mayores de 65 años. De acuerdo a Ziebarth, Schmitt y Karlsson (2013) los grupos más vulnerables son los recién nacidos, los niños y los mayores, mientras Hansman *et al* (2015) llaman la atención sobre el efecto en salud de los adultos mayores, especialmente en situaciones de salud respiratoria y pulmonar. Establecen que el impacto depende de la intensidad y duración de la exposición; existen efectos más elevados con niveles mayores de exposición, además de que la respuesta no es lineal de la mortalidad infantil a las reducciones de la contaminación del aire. En algunos estudios se han ponderado los efectos de la contaminación sobre la salud, de acuerdo a las condiciones ambientales derivado por el llamado cambio climático. En especial se considera que el aumento de la temperatura promedio mundial en los últimos 100 años (Stern, 2006) ha provocado fluctuaciones en las temperaturas locales más extremas, que combinadas con modificaciones en los

²⁵ http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/m_geoestadistico.aspx

²⁶ *Air Info Now*: http://www.airfonow.org/espanol/html/ed_particulate.html. son más ligeras, permanecen en el aire más tiempo y viajan más lejos, pero permanecen días o semanas en el cuerpo

²⁷ Ambas partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ pueden causar serios problemas a la salud, teóricamente respiratorios, debido a sus viajes más profundos en los pulmones y la composición de elementos tóxicos (metales pesados y compuestos orgánicos que causan cáncer). Sin embargo, parece que las $PM_{2.5}$ pueden tener efectos más severos en la salud.

movimientos de los vientos han provocado que los niveles de concentración de los contaminantes se mantengan estacionado y no se dispersen fácilmente.

Para el análisis espacial exploratorio en los indicadores de enfermedades y defunciones relativas, se aplica el índice de Moran y se construyen mapas tipo box-map²⁸ con la distribución espacial en la ZMVM. Con estos dos instrumentos se analiza la posibilidad de que exista dependencia y concentraciones espaciales, que puedan señalar la posibilidad de utilizar modelos espaciales (Anselin, 1999; Moreno y Vayá (2004).

En el cuadro 7 se muestran los resultados del índice de Moran y su *p-valor*, que se aplica para probar la hipótesis nula de que la dependencia espacial es igual a cero con respecto a la hipótesis alternativa de que es significativa. Para el caso del infarto agudo de miocardio, no se rechaza la existencia de dependencia espacial, sin embargo, se presentan valores extremos en Cocotitlán y Tepetlixpa (ver figura 1). Los municipios que presentan altos niveles de concentración son prácticamente todas las delegaciones del Distrito Federal, mientras que para el Estado de México solamente en Tlalnepantla, Tonanitla, Toetihuacán, Jilotzingo, Cocotitlán, Axapusco y Atlautla. Cuando se aplica el índice de Moran al porcentaje de defunciones por infarto agudo de miocardio a mayores de 65 y menores de 5 años, la prueba estadística sugiere que no existe evidencia de dependencia espacial. Para las enfermedades cerebrovasculares, el índice de Moran muestra una correlación espacial muy pequeña pero significativa, que puede observarse principalmente en los municipios de Azcapotzalco, Benito Juárez, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Coyoacán, Venustiano Carranza, Nezahualcóyotl, Juchitepec y Ecatepec. Sin embargo, no existe dependencia espacial para el porcentaje de defunciones por enfermedades cerebrovasculares para mayores de 65 y menores de 5 años.

El estadístico de Moran para las enfermedades isquémicas del corazón es 0.1951 y significativa, y de acuerdo con el box-map existe un grupo de municipios/delegaciones con alta concentración de estas enfermedades: Azcapotzalco, Benito Juárez, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Miguel Hidalgo, Iztacalco y Coyoacán, entre otros. Los resultados muestran que no existe dependencia espacial para el porcentaje de defunciones por enfermedades isquémicas del corazón para mayores de 65 y menores de 5 años.

²⁸ Se presentan algunas limitaciones, o igualmente utilizar índices de concentración/desigualdad como un índice de *Gini*, o de *Theil* (1912 y 1967). La observación del mapa ofrece una idea intuitiva de la correlación entre regiones vecinas o presencia de algunas regiones próximas con valores elevados o bajos de la variable.

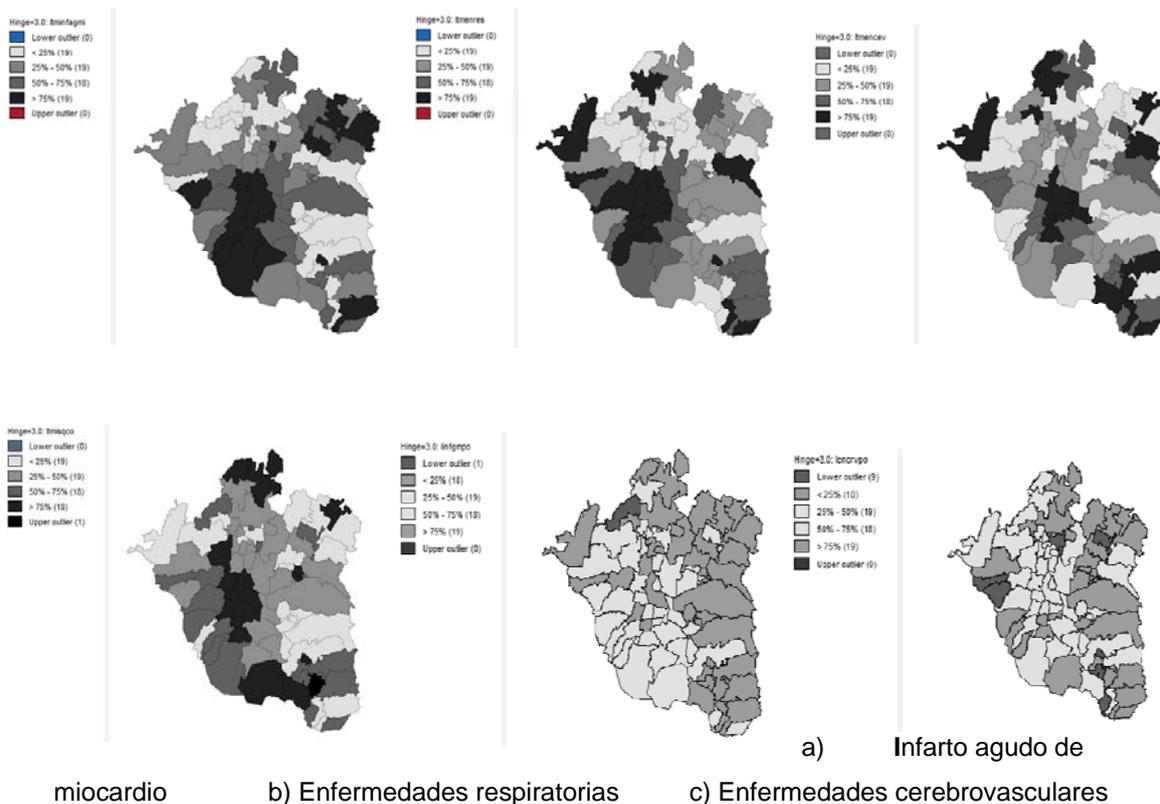
Cuadro 5: Valores de Índice de Moran y p -value.

Enfermedades	Índice de Moran y p -valor
Infarto Agudo de Miocardio	0.417
	0.000
Enfermedades cerebrovasculares	0.136
	0.042
Enfermedades Isquémicas del corazón	0.195
	0.004
Enfermedades Respiratorias	0.303
	0.000
Porcentaje de defunciones por Infarto Agudo de Miocardio (Mayores de 65 y menores de 5 años).	-0.027
	0.851
Porcentaje de defunciones por Enfermedades cerebrovasculares (Mayores de 65 y menores de 5 años).	0.012
	0.724
Porcentaje de defunciones por Enfermedades Isquémicas del corazón. (Mayores de 65 y menores de 5 años).	-0.010
	0.964
Porcentaje de defunciones por Enfermedades Respiratorias (Mayores de 65 y menores de 5 años).	0.207
	0.003

Fuente: Elaboración propia con cálculos elaborados con las librerías spdep del software R

Por último, los resultados del análisis de Moran para las enfermedades respiratorias y el porcentaje de defunciones por enfermedades respiratorias para mayores de 65 y menores de 5 años, indican la existencia de dependencia espacial. Con el box-map (figura 1) se observa que por encima de la media se encuentran todas las delegaciones del Distrito Federal con excepción de Tláhuac y Milpa Alta. Mientras que para la entidad mexiquense se encuentran Tlalmanalco, Tepetlaoxtoc, Nezahualcóyotl, Naucalpan de Juárez, Atlautla, entre otros. La mayoría de las delegaciones y municipios que presentan mayores tasas de mortalidad, presentan una mayor población y capacidad productiva.

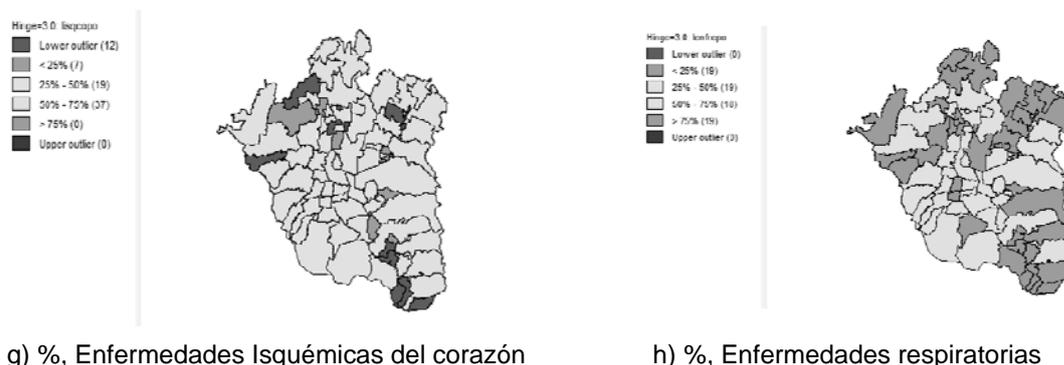
Figura 1: Mapas tipo box-map para la distribución de las enfermedades y defunciones relacionadas con la contaminación del medio ambiente en 2010



d) Enfermedades Isquémicas cerebrovasculares

e) %, Infarto agudo de miocardio

f) % Enfermedades cerebrovasculares



g) %, Enfermedades Isquémicas del corazón

h) %, Enfermedades respiratorias

Fuente: Elaboración propia con datos de SINAISS y software GeoDa y la librería spdep de R

5.2 Pruebas de hipótesis y resultados de las estimaciones de los modelos

La estrategia general que se siguió para aplicar la metodología consistió en estimar el modelo econométrico clásico (no espacial) con MCO, analizar la relación de los ocho contaminantes con respecto a las enfermedades y defunciones de la población más vulnerable (adultos mayores de 65 o más años y menores de 5 años) y revisar la posibilidad de correlación espacial con los estadísticos de Moran, multiplicadores de Lagrange (LM) y su versión robusta (RLM). Con la evidencia de posibles efectos espaciales, se estiman y analizan las implicaciones de los resultados de los modelos de rezago, error y durbin espacial.

Con la estimación del modelo clásico se analizan, bajo el supuesto de no interrelación y propagación en el espacio, los efectos posibles de los diferentes contaminantes en la explicación de las enfermedades o defunciones vinculadas a problemas de contaminación. Dado que las variables están transformadas con logaritmo natural, los parámetros son elasticidades y se puede indicar a que contaminantes es más sensible la enfermedad o la tasa de defunción por enfermedades relacionadas con los contaminantes; los resultados se muestran en el cuadro 6.

De acuerdo a los modelos de enfermedad o defunciones por enfermedad relacionadas con los contaminantes, se infiere lo siguiente: 1) El infarto agudo de miocardio se relacionan positivamente con la presencia del monóxido de carbono (CO) y con partículas suspendidas PM_{10} , y de forma negativa con el óxido de nitrógeno (NOx). Este último resultado se debe leer con cuidado, porque implicaría que a mayor contaminación de NOx menor posibilidad de un infarto agudo de miocardio. Los estadísticos de Moran, LM y LM robustos para identificar dependencia

espacial, muestran la posibilidad de estimar un modelo de rezago o de error espacial; 2) Las enfermedades cerebrovasculares también se relacionan positivamente con CO y PM_{10} . En este caso, los estadísticos no muestran la existencia de dependencia espacial; 3) El modelo de enfermedades isquémicas del corazón muestra relaciones positivas con CO y PM_{10} , y existe evidencia de correlación espacial para un modelo de rezago; 4) En el caso de las enfermedades respiratorias, los resultados indica relaciones positivas con CO y PM_{10} , negativo con NOx y los estadísticos indican no correlación espacial; 5) Para el caso de la proporción de defunciones por infarto agudo de miocardio en la población vulnerable de adultos mayores y niños meres de 5 años, se encontró que solamente se relaciona con mayores niveles de PM_{10} y no hay evidencia de dependencia espacial; 6) Los resultados para la proporción de defunciones por enfermedades cerebrovasculares no son consistentes, debido a que su reducción se relacionaría con mayores niveles de bióxido de azufre (SO_2) y el CO y de acuerdo a las pruebas estadísticas no existe evidencia de una relación espacial; 7) La misma inconsistencia se detectó con la proporción de defunciones por enfermedades isquémicas del corazón de los grupos vulnerables, pero vinculadas a la contaminación de CO y PM_{10} , y en este caso si existe evidencia del componente espacial en un modelo de rezago; y, 8) La proporción de las defunciones por enfermedades respiratorias de los grupos vulnerables se relaciona positivamente con mayores niveles de contaminación de CO y PM_{10} , negativamente con el SO_2 y todo indica correlación tipo rezago o error espacial. Es importante hacer notar, que los contaminantes de compuestos orgánicos totales (COT) y volátiles (COV) y el índice de marginación resultaron no significativos y por tanto relevantes en la explicación de las ocho enfermedades o defunciones relacionadas con la contaminación ambiental.

Cuadro 6: Efectos de los contaminantes relacionados con enfermedades y defunciones en la ZMVM en 2010

Modelo clásico estimado con MCO y pruebas de dependencia espacial

Contaminantes /Enfermedades	Infarto Agudo de Miocardio	Enfermedades Cerebrovasculares	Enfermedades isquémicas del corazón	Enfermedades respiratorias	% Defunciones por Infarto agudo de miocardio	% Defunciones por Enfermedades cerebrovasculares	% Defunciones por Enfermedades isquémicas del corazón	% Defunciones por Enfermedades respiratorias
PM10	0.099	0.122	0.075	0.086	0.027	-0.131	-0.149	0.016
p-valor	0.004	0.003	0.100	0.001	0.061	0.149	0.094	0.052
PM2.5	0.055	0.589	0.628	0.383	-0.102	0.755	0.953	0.100

p-valor	0.868	0.140	0.172	0.133	0.473	0.409	0.283	0.227
SO2	0.193	-0.114	-0.492	-0.360	0.048	-1.173	-0.793	-0.109
p-valor	0.360	0.648	0.092	0.027	0.590	0.045	0.160	0.039
CO	0.279	0.392	0.693	0.357	0.013	-0.761	-1.397	0.076
p-valor	0.066	0.031	0.001	0.002	0.833	0.067	0.001	0.044
NOx	-2.488	-0.468	-1.582	-1.461	0.033	1.021	-2.749	-0.156
p-valor	0.002	0.610	0.137	0.015	0.919	0.628	0.182	0.414
COT	-0.320	-0.659	0.845	-0.145	0.156	2.176	-0.864	-0.154
p-valor	0.734	0.557	0.514	0.840	0.697	0.400	0.730	0.510
COV	12.529	23.502	23.278	-7.946	-3.544	-45.398	60.483	5.032
p-valor	0.501	0.290	0.363	0.575	0.654	0.374	0.224	0.276
indmarg	-10.053	-23.126	-23.292	9.309	3.410	43.493	-55.479	-4.779
p-valor	0.573	0.278	0.343	0.493	0.653	0.375	0.245	0.281
R²	0.50	0.20	0.21	0.44	0.03	0.28	0.45	0.15
<i>Estadísticos para pruebas de dependencia espacial</i>								
I de Moran	0.69	0.12	0.01	0.40	0.75	0.35	0.91	0.03
LM (lag)	0.85	0.46	0.07	0.82	0.37	0.59	0.02	0.07
RLM (lag)	0.06	0.48	0.21	0.94	0.23	0.33	0.09	0.03
LM (error)	0.32	0.60	0.14	0.77	0.25	0.86	0.08	0.25
RLM (error)	0.03	0.63	0.53	0.83	0.16	0.41	0.56	0.09

Fuente: Elaboración propia con datos de SINAIS y SMA del GDF, 2010.

Nota: Las estimaciones se elaboraron con base a la librería *spdep* del software R

El modelo de rezago espacial es la primera variante al modelo clásico para incluir efectos espaciales, analizar la interrelación y la propagación en el espacio de los efectos posibles de los diferentes contaminantes en la explicación de las enfermedades o defunciones (ver cuadro 7). Los resultados muestran las siguientes implicaciones con respecto a los del modelo clásico: 1) En el modelo para el infarto agudo de miocardio, el parámetro ρ de rezago espacial es muy pequeño y no significativo, por tanto las conclusiones sobre las variables relevantes es la misma que el modelo clásico; 2) Para las enfermedades cerebrovasculares también se encontró que el coeficiente de rezago espacial es muy pequeño y no significativo, ahora son relevantes en la explicación los efectos de $PM_{2.5}$ junto con los contaminantes PM_{10} y CO ; 3) En el modelo de enfermedades isquémicas del corazón se observa que la dependencia espacial (ρ) es de 0.29 y significativo, lo cual implica interrelación dinámica y de propagación de los efectos de los contaminantes en la explicación de este tipo de enfermedad en los municipios o delegaciones y

sus vecinos cercanos en el espacio. Los contaminantes más importantes en la explicación de las enfermedades isquémicas del corazón son las PM_{10} y CO , y junto a la relevancia de la dependencia espacial ahora son importantes las $PM_{2.5}$; 4) En el caso de las enfermedades respiratorias, los resultados son los mismos que en el modelo clásico donde se identificaron relaciones positivas con CO y PM_{10} , negativo con NOx y el parámetro ρ es no significativo; 5) Con la estimación del modelo de rezago espacial se confirma que no es importante la dependencia espacial en la explicación de la proporción de defunciones por infarto agudo de miocardio en la población vulnerable de adultos mayores y niños meros de 5 años, y se mantiene el resultado de estar relacionado solamente el contaminante de PM_{10} ; 6) Como en el caso anterior, debido a que no existe dependencia en el modelo de rezago espacial, los resultados del modelo clásico se mantienen para explicar la proporción de defunciones por enfermedades cerebrovasculares.

Esto es, los resultados son inconsistentes, en relación a el signo negativo de los niveles de bióxido de azufre (SO_2) y el CO ; 7) Con el modelo rezago espacial se confirma la dependencia espacial para explicar la proporción de defunciones por enfermedades isquémicas del corazón de los grupos vulnerables, se mantiene la significancia y el signo negativo de la contaminación de CO , ya no es significativo PM_{10} y ahora se vuelve relevante el NOx . Sin embargo, como el parámetro ρ es negativo los contaminantes CO y NOx influyen negativamente en su lugar de localización y la concentración en los municipios vecinos afecta positivamente en la proporción de defunciones por enfermedades isquémicas del corazón de los grupos vulnerables; y, 8) Los resultados del modelo espacial para la proporción de las defunciones por enfermedades respiratorias de los grupos vulnerables, confirman la existencia de una dependencia espacial positiva, la relación positiva con mayores niveles de contaminación de CO y PM_{10} , ahora también con las $PM_{2.5}$ y negativamente con el SO_2 .

Las implicaciones más importantes de estos resultados es que los contaminantes de $PM_{2.5}$, PM_{10} y CO explican positivamente y directamente en los municipios donde se localizan la proporción de las defunciones por enfermedades respiratorias de los grupos vulnerables e indirectamente en las defunciones de los vecinos cercanos, lo cual implica la existencia de propagación de las enfermedades respiratorias en grupos vulnerables.

Cuadro 7: Modelo de rezago espacial para los efectos de los contaminantes relacionados con enfermedades y defunciones en la ZMVM en 2010

Contaminantes / Enfermedades	Infarto Agudo de Miocardio	Enfermedades Cerebrovasculares	Enfermedades isquémicas del corazón	Enfermedades respiratorias	% Defunciones por Infarto agudo de miocardio	% Defunciones por Enfermedades cerebrovasculares	% Defunciones por Enfermedades isquémicas del corazón	% Defunciones por Enfermedades respiratorias
PM10	0.097	0.121	0.069	0.087	0.028	-0.126	-0.104	0.013
p-valor	0.002	0.001	0.091	0.000	0.030	0.135	0.169	0.073
PM2.5	0.048	0.614	0.801	0.380	-0.100	0.676	0.718	0.123
p-valor	0.877	0.095	0.053	0.110	0.445	0.426	0.349	0.098
SO2	0.195	-0.116	-0.543	-0.363	0.048	-1.130	-0.684	-0.108
p-valor	0.321	0.619	0.038	0.015	0.558	0.035	0.158	0.022
CO	0.273	0.347	0.624	0.366	0.025	-0.812	-1.608	0.071
p-valor	0.057	0.037	0.001	0.001	0.673	0.035	0.000	0.034
NOx	-							
	2.441	-0.396	-1.249	-1.499	0.005	0.821	-3.222	-0.116
p-valor	0.002	0.643	0.197	0.014	0.986	0.677	0.074	0.500
COT	-							
	0.303	-0.706	0.630	-0.144	0.127	2.209	-0.554	-0.179
p-valor	0.731	0.498	0.590	0.829	0.732	0.358	0.798	0.396
COV	12.37							
	0	24.725	21.292	-8.108	-3.493	-42.884	61.357	4.652
p-valor	0.479	0.230	0.358	0.542	0.633	0.368	0.155	0.263
indmarg	-							
	9.952	-24.361	-21.507	9.510	3.407	41.236	-55.808	-4.434
p-valor	0.552	0.218	0.333	0.455	0.627	0.367	0.178	0.266
Rho	0.029	0.123	0.294	-0.036	-0.181	-0.122	-0.501	0.313
p-valor	0.846	0.454	0.064	0.819	0.330	0.522	0.004	0.058

Fuente: Elaboración propia con datos de SINAIS y SMA del GDF, 2010.

Nota: Las estimaciones se elaboraron con base a la librería spdep del software R

Para analizar los resultados del modelo de durbin espacial²⁹, es importante recordar que los efectos espaciales se incluyen al mismo tiempo los rezagos espaciales endógenos (WY_i) y los exógenos en variables explicativas (WX_i); véase cuadro 8. Los resultados fueron los siguientes: 1) En el modelo para el infarto agudo de miocardio, el parámetro ρ de rezago espacial es negativo, pero no significativo por lo que las externalidades endógenas no están presentes.

Para la explicación es muy importante las partículas suspendidas PM_{10} presentes en el municipio y en mayor medida por la concentración en los municipios vecinos; esto se infiere por que los parámetros son de 0.101 y 0.203 en PM_{10} y su rezago espacial (WPM_{10}) respectivamente. También se observa, que la enfermedad de infarto agudo de miocardio está altamente relacionado con concentraciones de $PM_{2.5}$, NOx y altos índices de marginación de los municipios o delegaciones vecinos; 2) Para las enfermedades cerebrovasculares, los efectos espaciales endógenos y exógenos no son relevantes en su explicación y solamente se relaciona positivamente con el PM_{10} observado en el municipio; 3) Los resultados del modelo para enfermedades isquémicas del corazón nos son mejores al del modelo de rezago espacial, porque no fueron relevantes los rezagos espaciales endógenos y exógenos, y solamente fue la contaminación del tipo CO ; 4) El modelo durbin muestra mejores resultados para explicar las enfermedades respiratorias, se identificaron relaciones positivas con CO y PM_{10} , al igual que el modelo clásico y de rezago espacial, y ahora también con la concentración $PM_{2.5}$, los contaminantes SO_2 y NOx influyen de forma negativa y el parámetro ρ es no significativo, por lo que el efecto espacial endógeno no es importante.

La concentración de PM_{10} , NOx y COT en los municipios vecinos resulto relevante para explicar las enfermedades respiratorias, no parecen consistente por los efectos negativo encontrados para SO_2 y COV . Por otro lado, también se pudo verificar la relación positiva con la presencia de alta marginación en los municipios vecinos; 5) La estimación del modelo durbin en la explicación de la proporción de defunciones por infarto agudo de miocardio en la población vulnerable de adultos mayores y niños meres de 5 años, dio resultados con menor poder explicativo que el modelo de rezago espacial y clásico, debido a que no son significativos la dependencia espacial endógena y ninguno de los contaminantes y sus rezagos espaciales son significativos; 6) Los resultados del modelo durbin, como el de rezago y clásico para explicar las defunciones por enfermedades cerebrovasculares, son inconsistentes al mostrar relaciones negativas con PM_{10} , SO_2 y el CO , y con el rezago espacial de CO y NOx ; 7) El modelo durbin da resultados muy parecidos al modelo rezago espacial para explicar la proporción de defunciones

²⁹ Los resultados del modelo de error espacial no es muy diferente al modelo de rezago espacial, por lo que se presentan en el anexo 1.

por enfermedades isquémicas del corazón de los grupos vulnerables de adultos mayores y niños meres de 5 años. En tal sentido, se confirma la dependencia espacial negativa, se mantiene la significancia y el signo negativo de CO , no es significativo PM_{10} y se vuelve relevante COV . La concentración de los contaminantes de los municipios vecinos (WX) resultaron positivos en PM_{10} y NOx , negativos para $PM_{2.5}$, CO y COV . El índice de marginación tiene un efecto negativo directo en la explicación de las defunciones por enfermedades isquémicas del corazón de los grupos vulnerables de adultos mayores y niños meres de 5 años, pero positivo con respecto a los municipios vecinos. Como se mencionó previamente, el parámetro ρ es negativo por lo que los efectos positivos de los contaminantes en un municipio se transmiten con un efecto explicativo negativo sobre las defunciones por enfermedades isquémicas del corazón de los grupos vulnerables de adultos mayores y niños meres de 5 años de los municipios vecinos; y, 8) Los resultados del modelo durbin no son mejores que el modelo de rezago espacial para explicar la proporción de las defunciones por enfermedades respiratorias de los grupos vulnerables. Las dependencias espaciales tipo endógena y exógena no fueron significativas, y solamente las variables de los contaminantes PM_{10} y $PM_{2.5}$ fueron significativas al 90% de confianza.

Cuadro 8: Modelo durbin espacial para los efectos de los contaminantes relacionados con enfermedades y defunciones en la ZMVM en 2010

Contaminantes / Enfermedades	Infarto Agudo de Miocardio	Enfermedades Cerebrovasculares	Enfermedades isquémicas del corazón	Enfermedades respiratorias	% Defunciones por Infarto agudo de miocardio	% Defunciones por Enfermedades cerebrovasculares	% Defunciones por Enfermedades isquémicas del corazón	% Defunciones por Enfermedades respiratorias
PM10	0.101	0.114	0.067	0.100	0.019	-0.143	-0.072	0.012
p-valor	0.000	0.002	0.112	0.000	0.140	0.085	0.324	0.109
PM2.5	0.273	0.542	0.586	0.491	-0.102	0.757	0.104	0.133
p-valor	0.373	0.175	0.206	0.035	0.473	0.408	0.894	0.108
SO2	-0.113	0.113	-0.313	-0.574	0.093	-0.695	-0.580	-0.093
p-valor	0.556	0.656	0.286	0.000	0.300	0.229	0.242	0.079
CO	0.170	0.114	0.435	0.365	-0.034	-0.792	-1.723	0.057
p-valor	0.242	0.556	0.051	0.001	0.624	0.071	0.000	0.152
NOx	-1.930	-0.067	-0.734	-1.722	0.491	4.140	-3.625	-0.004
p-valor	0.061	0.961	0.640	0.030	0.309	0.181	0.170	0.989
COT	-0.081	-0.732	0.482	0.360	0.005	2.569	0.040	-0.168
p-valor	0.916	0.474	0.683	0.543	0.989	0.267	0.984	0.430

COV	17.623	29.509	26.624	-10.454	-8.016	-69.537	81.542	1.426
p-valor	0.309	0.193	0.309	0.442	0.322	0.178	0.068	0.762
indmarg	-							
	15.816	-29.378	-27.057	11.676	7.550	63.730	-75.509	-1.345
p-valor	0.339	0.174	0.279	0.368	0.328	0.195	0.077	0.765
Rho	-0.251	0.105	0.242	-0.309	-0.255	-0.105	-0.552	0.208
p-valor	0.140	0.541	0.178	0.117	0.187	0.578	0.007	0.255
Contaminantes con rezago espacial								
(WX)								
PM10	0.203	0.037	0.032	0.094	0.046	0.203	0.379	0.009
p-valor	0.002	0.657	0.740	0.055	0.118	0.278	0.019	0.589
PM2.5	2.174	-1.982	-2.094	0.410	0.062	-3.938	-3.791	-0.121
p-valor	0.009	0.072	0.099	0.520	0.873	0.115	0.077	0.599
SO2	-1.146	0.655	1.193	-1.382	0.154	1.459	0.898	-0.072
p-valor	0.034	0.358	0.148	0.001	0.543	0.368	0.518	0.633
CO	0.325	0.583	0.278	0.060	0.178	-1.633	-1.494	0.047
p-valor	0.268	0.137	0.543	0.794	0.192	0.066	0.062	0.557
NOx	3.155	0.158	-0.020	3.841	-0.531	-9.994	8.088	-0.333
p-valor	0.058	0.941	0.994	0.002	0.485	0.039	0.053	0.454
COT	-0.243	0.869	0.591	4.017	-1.301	-0.811	6.921	0.343
p-valor	0.889	0.704	0.824	0.002	0.110	0.876	0.121	0.471
COV	131.52							
	3	-3.342	-1.463	-152.896	29.787	151.939	-300.953	7.795
p-valor	0.002	0.951	0.982	0.000	0.127	0.222	0.005	0.493
indmarg	127.38							
	2	3.264	1.722	145.933	-28.206	-137.299	290.252	-7.653
p-valor	0.001	0.950	0.977	0.000	0.130	0.248	0.005	0.482

Fuente: Elaboración propia con datos de SINAIS y SMA del GDF, 2010.

Nota: Las estimaciones se elaboraron con base a la librería spdep del software R

Conclusiones

El objetivo principal de esta investigación fue analizar, desde la perspectiva de las deseconomías de la aglomeración, los efectos de la contaminación ambiental en enfermedades relacionadas en la Zona Metropolitana del Valle de México. Para ello, se utilizaron el análisis exploratorio y los métodos de la econometría espacial para comprobar los efectos crecientes de la contaminación del aire sobre las defunciones en la ZMVM en 2010. Los resultados de las estimaciones de los modelos clásico y espaciales tipo rezago y durbin, muestran que existe una relación espacial de las emisiones PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , CO , NO_x , COT y COV con un mayor número de defunciones en la ZMVM, en especial en enfermedades isquémicas del corazón.

De igual manera, se encontró que, ante una mayor exposición a los contaminantes mencionados, se puede incrementar el número de personas por enfermedades cerebrovasculares. También se asegura que para enfermedades y males como los infartos agudos de miocardio no existe relación con contaminantes atmosféricos y que por lo tanto no hay evidencia de un fenómeno espacial en la ZMVM. Existe una relación positiva de las enfermedades respiratorias con los contaminantes descritos, además de factores que pueden influir directamente. Finalmente, con los resultados se puede asegurar que a su tamaño y el crecimiento de la ZMVM se encuentra en una etapa donde se está generando un excesivo nivel de contaminación, sobre todo en partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$ que se vinculan con el aumento de las defunciones y morbilidad en población vulnerable como son los niños hasta cinco años de edad y los adultos mayores.

Referencias

- Anselin, L. (1988). *Spatial econometrics: Methods and models*. Dordrecht: Kluwer Academic.
- Anselin, L. y S. Rey (1991). "Properties of tests for spatial dependence in linear regression models". *Geographical Analysis* 23:112–31.
- Anselin, L. (1992). *SpaceStat: A program for the analyst of spatial data*, National Center for Geographic Information and Analyst. University of California, Santa Barbara, CA.
- Anselin, L. y S. Hudak (1992). "Spatial econometrics in practice, a review of software options". *Regional Science and Urban Economics* 22: 509–536.
- Anselin L. y R. Florax (1995). "Small sample properties of tests for spatial dependence in regression models: Some further results. In *New Directions in Spatial Econometrics*, pp. 21–74. Berlin: Springer-Verlag
- Anselin L. y E. Talen (1998). "Assessing spatial equity: an evaluation of measures of accessibility to public playgrounds" *Environment and Planning* 30(4) 595 – 613.
- Anselin, L. (2000). "Computing Environments for Spatial Data Analysis. *Journal of Geographical Systems* 2 (3), 201–20.
- Anselin L. (2005). *GeoDa: An Introduction to Spatial Data Analysis*, Luc Anselin, Ibnu Syabri, Youngihn Kho Issue Volume 38, Issue 1, pages 5–22.
- Aroca, P. y M. Bosch (2000). "Crecimiento, Convergencia y Espacio en las regiones chilenas: 1960-1998", *Estudios de Economía*, Vol. 27, No. 2, pp. 199-224.
- Beckman, M. (1969). "On the distribution of urban rent and residential density" *Journal of Economic Theory*, Vol. 1: 60-67.
- Biblioteca Médica (2011). www.mhs.net/library/spanish%20hie%20multimedia.html, Consultada el 6 de abril de 2013.
- Cantillon, R. (1755). *Essai sur la nature du commerce en général*.
- Clínica Dam (2012), <https://www.ecologistasenaccion.org/article19723.html>. Consultado el 30 agosto de 2013.
- Consejo Nacional de Población (2012), http://www.conapo.gob.mx/en/CONAPO/Indices_de_Marginacion_Publicaciones. Consultado el 30 de mayo de 2012.
- Delimitación de las zonas metropolitanas de México, (2005). SEDESOL– CONAPO – INEGI
- Diccionario de Medicina (2006). Océano Mosby, 8ª ed., España.
- EPA, (2010). Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.

- Florax, R. J. G. M., Folmer and y Rey S. J. (2003). "Forthcoming. Specification searches in spatial econometrics: The relevance of Hendry's methodology", *Regional Science and Urban Economics* 33.
- Fujita, M. (1989). *Urban Economic Theory, Land Use and City Size*, Cambridge University Press.
- Gini, C. (1912). "Variability and Mutability, C. Cuppini, Bologna, 156 pages. Reprinted in *Memorie di metodologica statistica* (Ed. Pizetti E, Salvemini, T). Rome: Libreria Eredi Virgilio Veschi (1955).
- Heilbrun, J. (1987). *Urban Economics and Public Policy*, Palgrave MacMillan, 3a edición, U. S.
- Henderson J.V. y Y.M. Loannides (1983). "A Model of Housing Tenure Choice", *American Economic Review*.
- Hendry D. F. (1979). Predictive failure and econometric modelling in macroeconomics: The transaction demand for money. In P. Ormerod, (ed. *Economic Modelling*. Heinemann, London.
- INEGI (2010). *Censos de Población y Vivienda*.
- Inventario de Emisiones Criterio de la ZMVM (2010). *Sistema de Distribución Espacial y Temporal de las Emisiones Contaminantes y de Efecto Invernadero*, Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.
- Jiménez, C. B. E. (2001). *La Contaminación ambiental en México, causas, efectos y tecnología apropiada*. Limusa Editores. México, México.
- Kunzli, N. et al., (2000). "Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment", *Lancet*, 356: 795-801.
- LeSage, J. y K. R. Pace (2009). *Spatial Econometrics*, Taylor & Francis Group, Chapman & Hall/CRC.
- Manual de Medicina (1993). Joan Rodés Teixidor, Jaime Guardia Massó, Ediciones Científicas y Técnicas, S. A., Barcelona, España.
- Manual Merck de Información Médica para el hogar (1997). Editorial Océano, España.
- Marco Geostatistical Municipal (2000) www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/m_geoestadistico.aspx, INEGI.
- Mills, E. S. (1972). *Studies in the Structure of the Urban Economy*, Baltimore: Johns Hopkins Press.
- Moreno, R. y E. Vayá (2004), "Econometría espacial: nuevas técnicas para el análisis regional. Una aplicación a las regiones europeas", *Investigaciones Regionales*, 1- pp. 83-116.
- Muth R. F. (1969). *Cities and housing: the spatial pattern of urban residential land use*, Chicago, Illinois: University of Chicago Press, 355 p.
- O'Sullivan, A. (2007). *Urban Economics*, McGraw-Hill. Sexta Edición.
- Paelinck, J.; Klaassen, L. (1979). *Spatial econometrics*. Farnborough: Saxon House
- Petty, W. (1662). *A treatise of taxes & contributions*. Printed for C. Wilkinson and T. Burrell, at their shops in Flitstreet, London. P. A2. (Preface).

- Polèse, M. (1998). Economía urbana y regional, Introducción a la relación entre territorio y desarrollo, Libro Universitario Regional, Cartago, Costa Rica.
- Sarel, M. (1995). "NonLinear Effects of Inflation on Economic Growth, IMF Working Paper No. 95/56.
- Sistema Nacional de Información en Salud SINAIS, (2011).
www.sinais.salud.gob.mx/basesdedatos. Consultado el 09 de junio de 2011.
- Smith, A. (1776). An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations, Strahan W. y Cadell T., London. UK.
- Stevens, G. A. et al. (2008). The effects of 3 environmental risks on mortality disparities across Mexican communities, World Health Organization, CH-1211 Geneva, Suiza.
- Tarriba G. (2012). Calidad del aire y competitividad en las ciudades mexicanas: retos y soluciones. Instituto Mexicano de Competitividad.
- Theil, H. (1967). "Economics and Information Theory". Chicago: Rand McNally and Company. Theil, H. (1996). Studies in Global Econometrics. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Varian, H. (1994). Microeconomía Intermedia, Antoni Bosch Editor, Barcelona, España.
- Wark, K. y Warner, C. F. (2012). Contaminación del Aire, Origen y Control. Limusa, México.
- What is Particulate Matter? Air Info Now:
http://www.airinfoNOW.org/espanol/html/ed_particulate.html. Consultado el 11 de mayo de 2013.
- Wingo L. Jr. (1961). Transportation and Urban Land Use. The Johns Hopkins Press, Baltimore, MD.

Anexo 1: Modelo de error espacial para los efectos de los contaminantes relacionados con enfermedades y defunciones en la ZMVM en 2010

Contaminantes / Enfermedades	Infarto Agudo de Miocardio	Enfermedades Cerebrovasculares	Enfermedades isquémicas del corazón	Enfermedades respiratorias	% Defunciones por Infarto agudo de miocardio	% Defunciones por Enfermedades cerebrovasculares	% Defunciones por Enfermedades isquémicas del corazón	% Defunciones por Enfermedades respiratorias
PM10	0.119	0.122	0.073	0.087	0.030	-0.126	-0.025	0.014
p-valor	0.000	0.001	0.080	0.000	0.018	0.133	0.715	0.061
PM2.5	0.175	0.627	0.821	0.389	-0.096	0.716	0.261	0.115
p-valor	0.573	0.087	0.044	0.101	0.463	0.401	0.736	0.122
SO2	0.171	-0.111	-0.548	-0.379	0.054	-1.160	-0.528	-0.100
p-valor	0.388	0.629	0.031	0.012	0.520	0.032	0.296	0.030
CO	0.283	0.355	0.653	0.362	0.027	-0.780	-1.579	0.073
p-valor	0.031	0.036	0.001	0.001	0.632	0.040	0.000	0.042
NOx	-	-	-	-	-	-	-	-
	2.129	-0.456	-1.476	-1.357	0.029	0.931	-1.310	-0.114
p-valor	0.001	0.605	0.169	0.011	0.917	0.631	0.369	0.552
COT	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.520	-0.707	0.536	-0.093	0.066	2.206	0.314	-0.201
p-valor	0.548	0.497	0.644	0.889	0.857	0.360	0.880	0.342
COV	6.790	25.753	26.138	-10.531	-2.777	-44.997	7.704	4.560
p-valor	0.682	0.217	0.277	0.420	0.693	0.342	0.844	0.295
indmarg	-	-	-	-	-	-	-	-
	4.556	-25.350	-26.059	11.748	2.722	43.190	-4.748	-4.321
p-valor	0.774	0.205	0.260	0.348	0.686	0.341	0.899	0.301
Lambda	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.260	0.303	0.296	-0.085	-0.262	-0.043	-0.666	0.258
p-valor	0.223	0.582	0.106	0.705	0.188	0.836	0.007	0.184

Fuente: Elaboración propia con datos de SINAIS y SMA del GDF, 2010.

Nota: Las estimaciones se elaboraron con base a la librería spdep del software R