



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE ECONOMÍA Y NEGOCIOS
ESCUELA DE ECONOMÍA Y ADMINISTRACIÓN

**IMPACTO DE LA RESTRICCIÓN VEHICULAR SOBRE LA CALIDAD DEL AIRE:
LECCIONES PARA SANTIAGO DE CHILE**

**Seminario para optar al título de
Ingeniero Comercial, Mención Economía**

Guillermo Sepúlveda Witt

Profesor Guía:

Christian Belmar Castro

Santiago – Julio 2017

“La propiedad intelectual de este trabajo es del profesor que dirigió el Seminario y de los participantes”

Agradecimientos

A mis padres Carlos y Tatiana por su apoyo incondicional y sabio consejo, y a mi hermana Tatiana y a Helga por su apoyo.

Al profesor Christian Belmar por su guía y conocimientos entregados, que me permitieron mejorar constantemente.

Resumen

Desde la implementación del Plan de Prevención Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana en 1998, la restricción vehicular (RV) ha sido una de las medidas angulares para combatir los altos niveles de polución del aire que sufre Santiago de Chile. Sin embargo, en tiempos recientes la efectividad e idoneidad de la medida ha sido cuestionada por expertos y el público en general por igual. En este trabajo se desarrolla un marco de los factores de múltiple naturaleza que determinan la polución atmosférica, el cual permite prever el impacto potencial de la RV según el contexto. Posteriormente, mediante una regresión de mínimos cuadrados ordinarios y un diseño de regresión discontinua, se analiza la evidencia de la efectividad de la RV en disminuir los niveles de MP10 y CO en Santiago, analizando por separado el formato original de 1998 y la posterior actualización de 2007. Los resultados indican que, en un principio, la RV fue efectiva en disminuir los niveles de ambos contaminantes. Sin embargo, la medida se ha vuelto inefectiva, observándose un aumento de la polución tras la actualización de 2007. En base a esto resultados, se analizan posibles explicaciones a la pérdida de efectividad de la RV, como, por ejemplo, el excesivo aumento del parque automotriz o de hogares con más de un vehículo. Finalmente, se analizan posibles enfoques para tratar la polución del aire proveniente de fuentes móviles de manera efectiva, y se entrega una propuesta de plan estratégico.

Índice

1.	Introducción	7
2.	Las emisiones de un vehículo y su impacto	10
3.	Santiago de Chile y la restricción vehicular	13
4.	Fuentes y composición de la contaminación del aire en Santiago	17
5.	Marco teórico	20
5.1	Modelos de la emisión y comportamiento de la polución atmosférica proveniente del transporte.	20
5.1.1	Modelos de la emisión y comportamiento de la polución atmosférica proveniente del transporte.	20
5.1.1.1	Vehículos y sus emisiones.	22
5.1.2	Modelos de comportamiento de emisiones en la atmósfera.	24
5.1.2.1	La Meteorología y su impacto en la polución del aire.	26
5.2	Política ambiental y la polución del aire.	28
5.2.1	La restricción vehicular.	31
5.3	Modelo teórico.	31
6.	Restricción vehicular y la calidad del aire	34
6.1	Evidencia empírica previa.	34
7.	Estrategia de identificación	37
7.1	Datos.	37
7.1.1	Análisis de datos.	40
7.2	Modelo.	47
7.3	Resultados.	49
7.4	Robustez.	54
7.5	Explicaciones a los resultados.....	59
7.5.1	Aumento del parque automotriz.	59
7.5.2	Cambio en la composición del parque automotriz	60
7.5.3	Uso de medios de transportes alternativos	61

7.5.4	Adquisición de un segundo vehículo	62
8.	Medidas tradicionales para controlar las emisiones del transporte.....	63
8.1	Medidas tradicionales.....	63
8.2	Nuevas tendencias.....	65
9.	Enfoque estratégico	67
9.1.	Avoid – Shift – Improve.	68
9.1.2.	Rutas hacia la movilidad sostenible	70
9.2.	Plan de Movilidad Urbana Sustentable	72
10.	¿Qué se está haciendo en Santiago?	74
11.	Propuesta de política pública.....	75
12.	El rol de las comunas	80
13.	Conclusiones	83
14.	Referencias.....	85
15.	Anexos	95

1. Introducción

El transporte ha jugado un rol central en el desarrollo humano, ya sea desde una perspectiva económica, cultural o social e incluso religiosa. Este fenómeno se hace evidente al observar que, ninguna de las grandes civilizaciones que han existido, lo ha hecho sin haber desarrollado un sistema de transporte bien estructurado y definido, aunque no siempre el transporte es el causante de desarrollo, sino, el resultado (Lewis, 1936).

Las ciudades son polos políticos, económicos, tecnológicos, culturales y de interacciones socioeconómicas, que han dado origen a las civilizaciones. Las ciudades, son una organización espacial de funciones para satisfacer las necesidades humanas, y el valor de este espacio, depende de su capacidad para facilitar interacciones, lo cual requiere de un movimiento eficiente de recursos, bienes y personas (United Nations Centre for Human Settlements, 2001); es por esto que, de todas las formas de transporte, una de las más importantes es el transporte urbano sobre caminos, cuya constante innovación y evolución, ha sido parte fundamental del desarrollo y éxito de las principales urbes del mundo, como Santiago. A pesar de los grandes beneficios del transporte, este no está exento de externalidades negativas, como lo son el ruido, la congestión, el daño a la infraestructura, la polución del aire y el cambio climático.

La polución del aire es uno de los mayores problemas que enfrentan las ciudades alrededor del mundo (European Environment Agency (EEA), 2016a; World Bank and Institute for Health Metrics and Evaluation (WB), 2016), producto de las graves consecuencias que tiene sobre la salud y el medioambiente, como, por ejemplo, enfermedades respiratorias y cardiovasculares, y cambios en el balance químico del suelo, el agua o la atmósfera (EEA, 2016a; World Meteorological Organization (WHO), 2016; Nurul Amin, 2009). Actualmente la gravedad de este problema ya no pasa desapercibida por la población en general. Según la Tercera Encuesta Nacional del Medio Ambiente de Chile (MMA, 2017), un 43,2% de los chilenos señala que el estado del medioambiente en general es malo y un 45,8% señala que el componente del medio ambiente más afectado es el aire. Adicionalmente, el 38,3% de los chilenos declara que el principal problema que le afecta es la contaminación del aire, cifra que se eleva a un 47,9% en el Gran Santiago.

El mayor contribuyente a la polución en zonas urbanas es el transporte por caminos, el cual genera entre un 25% y 60% del total de la polución, dependiendo del contaminante (Universidad de Santiago de Chile, 2014; Karagulian et al., 2015), y un 25% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provenientes del uso de combustibles fósiles, los cuales son responsables desde un 40% hasta 80% de los problemas asociados a la calidad del aire en las grandes ciudades de Latinoamérica (Ghose, 2002). Adicionalmente, en las ciudades el problema de la polución se ve agravado por la alta densidad de personas, la alta densidad de vehículos, y la estructura y diseño de las propias ciudades.

Una solución a este problema es la restricción vehicular, medida que ha sido utilizada ampliamente para tratar el problema de la polución del aire en zonas urbanas, particularmente para hacer frente a episodios críticos de contaminación del aire o para controlar el nivel de contaminación durante los periodos más susceptibles a altos niveles de contaminación—generalmente los meses de invierno—. La restricción vehicular también se utiliza para hacer frente a otros problemas, tales como, la congestión o el uso excesivo de combustible. La implementación de esta medida se ha dado principalmente en países latinoamericanos, bajo la modalidad de número de patente¹, es decir, en base al número de patente, la autoridad decide a qué vehículos restringir la circulación durante un periodo determinado (Cantillo y Ortúzar, 2012). Algunas ciudades donde se ha implementado un régimen de restricción vehicular son Atenas (1982), Santiago de Chile (1986), Ciudad de México (1989), Sao Paulo (1996), Bogotá (1998), Medellín (2005), San José (2005), Beijing (2008), Quito (2010), Lanzhou (2010), Tianjin (2014) y Nueva Delhi (2016).

La restricción vehicular por número de patente ha sido implementada casi exclusivamente en países en desarrollo, particularmente en Latinoamérica y más recientemente en China. Esto se debería, entre otros factores, a que los planificadores y políticos la consideran la segunda mejor opción respecto al cargo por congestión—medida popular en las naciones desarrolladas—(Fresard, 1998), por la gran aceptación social que la medida tendría en estos países, gracias a que en estas regiones la proporción de la población que posee vehículo particular es mucho menor (Fresard, 1998) y a que se observan buenos resultados en el corto plazo (Jia. Zhang, He & Li, 2015).

¹ Otras modalidades de restricción vehicular son las zonas de baja emisión (Wolff y Perry, 2010) y los cargos por congestión (Gibson y Carnovale, 2015).

El amplio y creciente uso de la restricción vehicular, ha motivado la realización de diversos estudios para analizar su eficacia. En general, las investigaciones señalan que en el corto plazo se observan beneficios, tales como, la disminución de la congestión (Cantillo y Ortuzar, 2011), disminución de la polución del aire (Gallego, Montero & Salas, 2013; Cantillo y Ortuzar, 2011) o la conducción de vehículos menos contaminante por parte de los conductores de mayores recursos (Fresard, 1998). Sin embargo, los estudios señalan que, hacia el mediano y largo plazo, la política tendría efectos no significativos o incluso negativos. Entre los hallazgos, se tiene que, la restricción por número de patente genera un aumento del parque automotriz (Davis, 2008; Eskeland & Feyzioglu, 1997), fomenta la adquisición de un segundo vehículo más contaminante (Davis, 2008; Fresard, 1998), aumenta de la polución en el largo plazo (Gallego et. al., 2013; Cantillo y Ortuzar, 2011) o no tiene impacto significativo (Davis, 2008).

La experiencia de Santiago no difiere de lo observado en el resto del mundo. Tras su primera implementación en 1986, la restricción no fue tan efectiva, lo llevó a que, en 1996, Santiago fuera declarada zona saturada de diversos contaminantes (Martínez, 2004). Este acontecimiento, impulsó la creación del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana (PPDA RM) en 1998². Este plan, entre otras medidas, establece a la restricción vehicular como una de las medidas centrales para controlar la calidad del aire en Santiago. Dada las características particulares de la medida chilena, la restricción vehicular incentivó la renovación del parque automotriz por vehículos con convertidor catalítico, los cuales representan más del 98% del parque automotriz de la Región Metropolitana³, contribuyendo a la reducción de la polución, sobre todo del material particulado (MMA, 2015), aunque es difícil precisar su aporte frente a otras medidas. Sin embargo, estudios también han mostrado que la restricción vehicular ha incentivado la adquisición de un segundo vehículo, generalmente más contaminante (Fresard, 1998; de Grange y Troncoso, 2011). Además, de Grange y Troncoso (2015) concluyen que la restricción ha provocado un desplazamiento de los viajes hacia horarios exentos de restricción, y que la restricción vehicular (adicional a la estándar) sólo disminuye en

² Decreto Supremo 16/1998, MINSEGPRES.

³³ INE noticias. Más de 4,9 millones de vehículos circularon en el país durante 2016. Recuperado de <http://www.ine.cl/prensa/detalle-prensa/2017/05/22/m%C3%A1s-de-4-9-millones-de-veh%C3%ADculos-circularon-en-el-pa%C3%ADs-durante-2016>.

un 5,5% el uso de vehículos privados. La restricción vehicular estándar no tendría impacto sobre el uso de vehículos privados.

Sin lugar a dudas la restricción vehicular ha contribuido en el pasado a la mejora de la calidad de aire en Santiago, pero en vista de lo mencionado anteriormente, cabe preguntarse cuán pertinente es esta medida en el escenario actual y futuro de Santiago. Para dar luces al respecto, en este trabajo se evaluará el impacto que tiene la restricción vehicular sobre la calidad del aire de Santiago, particularmente sobre la concentración de dos de los principales contaminantes provenientes de fuentes móviles, los cuales son, el MP₁₀, y CO. Para ello, se desarrollará un modelo de regresión discontinua, con la cual se analizará el impacto local de la medida en torno a su fecha de implementación en 1998—como parte del Plan de Descontaminación Atmosférica de Santiago— y a su actualización en el año 2007. Esta metodología ha sido ampliamente utilizada previamente para evaluar políticas medioambientales, incluyendo a de Grange (2011), Auffhammer y Kellogg (2011) y Zhang, Lawell & Umanskaya (2016). Con los resultados del modelo, la evidencia empírica previa nacional e internacional, y un análisis de otras políticas medioambientales destinadas a reducir la contaminación en zonas urbanas provenientes de fuentes móviles, se entregará recomendaciones de medidas medioambientales destinadas a mejorar la calidad del aire en Santiago de Chile.

2. Las emisiones de un vehículo y su impacto

El vehículo privado es el medio de transporte más utilizado a nivel global, particularmente en zonas urbanas. En el Gran Santiago, en un día laboral normal, el 28% del total de viajes son hechos en transporte privado, cifra que puede alcanzar el 62% en las comunas de mayores ingresos como Vitacura (Encuesta de Origen y Destino de Viajes de Santiago, 2012). Se espera que el uso del vehículo se siga intensificando; en el caso particular de Santiago, hacia 2025 se espera que el parque automotriz se duplique alcanzando los 2,7 millones de vehículos y se espera—escenario base—que en horario peak, 58% de los viajes prefieran realizarse en transporte privado versus el público (Subsecretaría de Transporte, 2013).

El transporte global depende fuertemente de los hidrocarburos. Del total de energía utilizada en transporte a nivel global, un 78% proviene de combustibles fósiles, y un 52% es utilizado por vehículos livianos (WEC, 2012). En el caso de Chile, el parque automotriz de vehículos livianos y medianos está compuesto en un 99,8% por vehículos a gasolina o diésel, y sólo un 0,2% utiliza otra fuente de energía, como biocombustibles o electricidad (Asociación Nacional Automotriz de Chile, 2016). Esta dependencia en los combustibles fósiles hace que el transporte sea una de las principales fuentes de gases de efecto invernadero (GEI) y de contaminación del aire, siendo el más contaminante el transporte por carretera, el cual, por ejemplo, es responsable del 76% de las emisiones de GEI del sector transporte (Sims et. al, 2014), el que a su vez es responsable del 14% de las emisiones totales de GEI global (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014).

Los vehículos producen una serie de contaminantes atmosféricos—los cuales varían según las características técnicas—que conforman la contaminación del aire. Los principales, regulados por la normativa medioambiental, se muestran en la tabla 1.

En 2013, la contaminación del aire provocó a nivel global, 5,5 millones de muertes anticipadas, con un costo para la economía mundial de USD 225 mil millones en pérdidas de ingresos laborales (WB & IHME, 2016). En Chile, durante 2015, la contaminación generó 5.900 muertes anticipadas (Health Effect Institute, 2016). Por otro lado, para 2060 se espera que la contaminación genere entre 6 y 9 millones de muertes anticipadas a nivel mundial, con un costo económico equivalente al 1% del PIB mundial, unos USD 2,6 billones anuales (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2016).

A los efectos de la contaminación, hay que agregar el cambio climático. Adicional al CO₂, los vehículos emiten otros GEIs, de los cuales los principales son: el óxido nítrico (N₂O), el metano (CH₄) y los gases de refrigeración del sistema aire acondicionado (HCF). En promedio, el 95-99% del potencial de calentamiento global de las emisiones de GEI de un vehículo corresponden a CO₂ (EPA, 2014). Es importante notar que el ozono (O₃) es un GEI generado indirectamente por las emisiones de vehículos (HC_s, CO y NO_x), el cual provoca irritación ocular y daño pulmonar.

Visto de forma general, los efectos del cambio climático son; el aumento de la temperatura promedio global, el derretimiento de los casquetes polares y glaciares, el aumento

del nivel del mar, cambios en los patrones de lluvias y eventos climáticos extremos. Todos estos fenómenos provocarán cambios en los ecosistemas, cambios en el uso del suelo, cambios en los recursos hídricos, estrés psicológico y físico—entre otros—, afectando a la agricultura, la disponibilidad de agua potable, generando cambios en el comportamiento de las enfermedades y generando desplazamientos poblacionales, entre otros efectos. (EEA, 2017; Crimmins et al., 2016).

Tabla 1: Principales contaminantes emitidos por vehículos.

Contaminante	Formación	Características
Dióxido de Carbono (CO₂)	Producto natural del proceso de combustión	Es el principal GEI, lo cual lo posiciona como una amenaza para la salud y el medioambiente.
Hidrocarburos (HC_s)	Producto de la combustión incompleta o parcial del combustible	Los HC _s y particularmente los compuestos orgánicos volátiles (VOC _s), contribuyen a la formación de ozono (O ₃) a nivel del suelo y de smog fotoquímico
Monóxido de Carbono (CO)	Producto de la combustión incompleta	Altamente tóxico; provoca una reducción del flujo de oxígeno en el torrente sanguíneo. Al igual que los HC _s , contribuye a la formación de ozono a nivel del suelo y de smog
Material Particulado (MP)	Producto de la combustión incompleta, y es una mezcla de MP primario y secundario	El MP primario es emitido directamente a la atmosfera mientras que el PM secundario se forma en la atmosfera producto de la emisión de gases precursores (principalmente SO ₂ , NO _x , NH ₃ y VOC _s). El PM cuando penetra en el sistema respiratorio puede causar o agravar enfermedades pulmonares, cardiovasculares y cáncer
Óxidos de Nitrógeno (NO_x)	Producto de combustión a alta temperatura	Generan MP secundario y ozono a nivel del suelo, y causan daño medioambiental a través de la acidificación y la eutrofización de los suelos y aguas. El dióxido de nitrógeno (NO ₂) es muy toxico y radioactivo, provocando daño pulmonar

Fuente: UNEP (2009) y EEA (2016a).

Se observa la existencia de una relación entre el cambio climático y la contaminación del aire, los cuales se influyen por medio de interacciones en la atmósfera. Varios elementos que

conforman la polución son GEI, los cuales afectan el balance de la atmósfera generando el cambio climático. A su vez, los cambios en la temperatura y en los patrones de lluvia generados por el cambio climático, afectan a los niveles de polución en la atmósfera (Crimmins et al., 2016; Andersson & Engardt, 2010). La relación más fuerte se encuentra en el ozono, donde diversos estudios han identificado a la temperatura como la principal variable meteorológica que afecta la concentración de ozono en zonas con polución del aire (Jacob y Winner, 2009). Aunque más débil, también se observa una correlación entre el material particulado, la temperatura y las precipitaciones (Jacob y Winner, 2009; Andersson & Engardt 2010); esto se debe a la gran variedad de elementos que componen el PM, lo cual hace que la interacción sea muy compleja.

3. Santiago de Chile y la restricción vehicular

Santiago ha tenido problemas de contaminación del aire desde hace varias décadas, producto de sus características geográficas, meteorológicas, demográficas y su diseño urbano. La ciudad se emplaza en la depresión intermedia, particularmente sobre la cuenca de Santiago, la cual posee suaves pendientes con un declive de Este a Oeste y se ve interrumpida por el surco del río Maipo. La cuenca se encuentra entre la cordillera de la costa por el oeste, la cual supera los 1.200 metros de altura, la cordillera de los Andes por el este, la cual supera los 4.500 metros de altura, y por el norte y sur se encuentra parcialmente confinada por cordones montañosos. Posee un clima semiárido con una precipitación promedio anual de 360,9 mm. La influencia del anticiclón subtropical del Pacífico suroriental provoca la existencia persistente de inversión térmica, la cual se acentúa en los meses de invierno (Garreaud y Rutllant, 2006). El semiconfinamiento de la cuenca provoca que la ciudad posea una mala ventilación durante todo el año (Martínez, 2004).

Conforme Santiago se fue desarrollando, las condiciones anteriormente mencionadas fueron agravando el problema de la contaminación del aire, hasta que, en 1986, para controlar la alta concentración de PM₁₀ en el aire (de Grange y Troncoso, 2011), se establece por primera vez la restricción vehicular. La restricción afectaba a todo el parque automotriz privado, y regía entre los meses de mayo y agosto. La medida en su formato original se fue aplicando con mayor

frecuencia, hasta que en 1991 se modifica. Con el fin de fomentar la renovación tecnológica del parque automotriz, a partir de 1991 se exige de la restricción a aquellos vehículos con sello verde, otorgado a vehículos con convertidor catalítico.

Las medidas tomadas hasta mediados de los 90's no fueron suficientes, y en 1996, Santiago es declarada zona saturada por O₃, MP₁₀, PTS y CO, y zona latente de NO₂⁴ (Martínez, 2004). Debido a lo anterior, se crea, en 1998, el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana (PPDA RM). Este plan establece a la restricción vehicular como una de las medidas centrales para controlar la calidad del aire en Santiago, pero también contempla otras medidas, tales como, restricción a las emisiones o funcionamiento de las industrias, o la prohibición del uso de la leña como combustible. Posterior a su implementación, el PPDA RM ha sufrido modificaciones en los años 2000⁵, 2004⁶, 2007⁷ y 2010⁸. El PPDA RM establece una restricción permanente base para vehículos sin sello verde (S/SV) y establece un sistema de estados críticos ambientales, los cuales son alerta, preemergencia y emergencia ambiental, bajo los cuales se agregan dígitos a la restricción y se incorporan los vehículos con sello verde (C/SV) según corresponda. En cada una de las actualizaciones, se han agregado más dígitos a la restricción o se ha endurecido la norma de emisiones de contaminantes para vehículos nuevos, entre otras medidas.

Las características principales de la restricción vehicular para vehículos particulares livianos para el periodo 2003-2016, —la cual rige entre las 7:00 y las 21:00 horas— se presentan en la tabla 2.

Los estados ambientales se decretan en base a la calidad del aire pronosticado por el Centro Nacional del Medio Ambiente de Chile (CENMA), el cual utiliza el modelo desarrollado por Joseph Cassmassi para hacer los pronósticos⁹. El criterio para definir los estados ambientales es la concentración media móvil de 24 horas de PM10¹⁰.

⁴ Decreto supremo 131/1996. MINSEGPRES.

⁵ Decreto 20/2000. MINSEGPRES.

⁶ Decreto 58/2004. MINSEGPRES.

⁷ Decreto 46/2005. MINSEGPRES.

⁸ Decreto 66/2010, MINSEGPRES.

⁹ Resolución 10047/2000, MINSEGPRES.

¹⁰ Decreto Supremo 59/1998 y 45/2001, MINSEGPRES.

Para poner en perspectiva a la norma aplicada a Santiago, en la tabla 3 se presenta la norma de Bogotá, Colombia, para la declaración de estados excepcionales de calidad del aire. Se observa que la normativa chilena es más estricta en la declaración de estados ambientales en base a la concentración de PM₁₀, donde la normativa chilena establece un límite de una concentración de 195 µg/m³ en 24 horas para declarar una alerta ambiental, mientras que la normativa colombiana establece un nivel de 300 µg/m³ en 24 horas para declarar un estado excepcional equivalente. Sin embargo, comparando ambas normas, se puede identificar una falencia de la normativa chilena.

Tabla 2: Características restricción vehicular para vehículos livianos, periodo 2003-2016.

MP10 esperado (ug/m3) en 24 horas	Estado	Tipo vehículo	Día	Cantidad de Dígitos	
				Periodo 1998-2006	Periodo 2007-2016
194 o inferior	Base	S/SV	Semana	2	4
			Fin de semana	0	0
		C/SV	Semana	0	0
			Fin de semana	0	0
195-239	Alerta	S/SV	Semana	4	4
			Fin de semana	2	0
		C/SV	Semana	0	0
			Fin de semana	0	0
240-329	Preemergencia	S/SV	Semana	6	6
			Fin de semana	4	6
		C/SV	Semana	2	4
			Fin de semana	2	4
330 o superior	Emergencia	S/SV	Semana	8	8
			Fin de semana	6	8
		C/SV	Semana	4	6
			Fin de semana	4	6

Nota: S/SV: Vehículos sin sello verde. C/SV: vehículos con sello verde.

Fuente: Decreto Supremo 16/1998, Decreto 58/2004, Decreto 46/2007 y Decreto 66/2010 de MINSEGPRES.

Mientras que la normativa chilena se basa exclusivamente en la concentración de PM₁₀ para declarar estados excepcionales, la normativa colombiana declara estados excepcionales en base a concentraciones umbrales de diversos contaminantes, por lo que potencialmente, previene el alcanzar niveles críticos de una mayor cantidad de elementos nocivos para la salud. A pesar de que en general, la normativa ambiental chilena es más estricta que la de sus pares

latinoamericanos, al compararla con la normativa de países industrializados la perspectiva cambia; por ejemplo, la normativa francesa establece un límite de 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de MP_{10} ¹¹ en 24 horas, para establecer un estado de emergencia ambiental en la ciudad de París.

Tabla 3: Norma de declaración de estados críticos de calidad del aire, Bogotá, Colombia.

Contaminante	Unidad	Tiempo de exposición	Estados excepcionales		
			Prevención	Alerta	Emergencia
PST	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 horas	375	625	875
MP10	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 horas	300	400	500
SO2	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 horas	500	1.000	1.600
NO2	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1 hora	400	800	2.000
O3	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1 hora	350	700	1.000
CO	(mg/m^3)	8 horas	17	34	46

Fuente: Resolución 601 de 2006 del Ministerio de Medioambiente, Vivienda y desarrollo Territorial de Colombia.

En la tabla 4 se muestran el número episodios críticos decretados en el periodo 2003-2016, desagregados por año. La evolución de la frecuencia de los episodios críticos no evidencia una mejora de calidad del aire en los últimos años, donde durante 2015 y 2016 se alcanzan máximos históricos en la cantidad de episodios críticos.

Tabla 4: Episodio críticos por año, periodo 2003-2016

Año	Tipo estado ambiental		
	Alerta	Preemergencia	Emergencia
2003	21	5	0
2004	13	2	0
2005	7	2	0
2006	21	3	0
2007	27	4	0
2008	21	8	0
2009	23	0	0
2010	7	3	0
2011	20	6	0
2012	23	2	0

¹¹ Air Parif. French standards. Recuperado de <https://www.airparif.asso.fr/en/reglementation/normes-francaises>

2013	6	0	0
2014	22	1	0
2015	38	16	1
2016	31	13	1
Total	280	65	2

Fuente: Unidad Operativa de Control de Tránsito (UOCT).

4. Fuentes y composición de la contaminación del aire en Santiago

Para analizar los contaminantes y sus fuentes en Santiago, se utilizan los datos del estudio “Actualización y sistematización del inventario de emisiones contaminantes atmosféricos en la Región Metropolitana”, realizado por el Departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile en 2014. Es importante señalar que la información entregada en esta sección proviene de los datos agregados de la Región Metropolitana (RM). Considerando la magnitud de Santiago respecto al resto de la región, es razonable suponer que los resultados no varían significativamente.

La tabla 5 resume el aporte de los principales sectores económicos de la Región Metropolitana, de los principales contaminantes del aire.

Tabla 5: Aportes por sector a las emisiones de contaminantes.

Sector	Contaminantes (%)									
	MP10	MP2,5	NOx	SOx	HCS	COV	CO	CH4	NH3	CO2
Industria	11,3	11,3	9,6	78,2		0,0	0,7			11,6
Residencial	33,2	35,5	3,5	11,6		55,2	13,1	1,8	0,5	2,1
Evaporativas						29,3				
Agrícolas	3,1	3,1	0,2	0,6	0,0	15,5	1,4	98,2	93,5	1,8
Transporte* **	43,7	41,0	76,6	9,4	93,4		81,2	0,0	5,9	79,2
Construcción***	8,6	9,1	10,2	0,2	6,6		3,5			5,2
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Total (ton/año)	6.578	5.854	51.386	2.544	15.148	97.028	154.795	89.697	35.702	13.127.208

* No incluye resuspensión del MP10 y MP2,5. ** MP10 se calculó suponiendo que es un 20% más alto que el MP2,5.

***Corresponde a vehículos fuera de ruta utilizados en construcción.

Fuente: Elaboración propia en base a resultados de la tabla 5 del informe Actualización y Sistematización del Inventario de Emisiones Contaminantes Atmosféricos en la Región Metropolitana, USACH, 2014.

De la tabla 5, se aprecia que el sector transporte es el principal responsable de las emisiones de material particulado MP10 y MP2,5 con un 43,7% y un 41% respectivamente, de los óxidos de nitrógeno (NOx) con un 76,6%, de los hidrocarburos (HCs) con un 93,4%, del monóxido de carbono (CO) con un 81,2% y del dióxido de carbono, con un 79,2% del total de emisiones.

La tabla 6 muestra el detalle de los aportes a las emisiones de contaminantes de los vehículos en ruta. Se observa que, para todos los contaminantes, el mayor aporte de emisiones proviene del transporte en vías principales o secundarias, es decir, de vehículos circulando en el radio urbano, excluyendo al transporte público, el cual tiene el menor aporte de contaminantes. Este resultado, es un indicador del intensivo y extensivo uso que se le da al vehículo privado dentro del radio urbano de Santiago, lo cual no solo genera graves problemas de contaminación del aire, sino también, por ejemplo, de congestión o contaminación acústica. Es importante señalar que los autores del estudio no incluyen en sus resultados la re-suspensión del material particulado producido por la circulación de los vehículos, a causa de la gran heterogeneidad de los resultados obtenidos por diversos estudios¹².

Tabla 6: Aportes de vehículos en ruta a las emisiones de contaminantes

Sector	Contaminantes (%)									
	MP10	MP2,5	NOx	SOx	HCs	COV	CO	CH4	NH3	CO2
Transporte público	2,5	2,5	11,5	1,7	1,1		0,7		0,0	4,3
Transporte en carretera	11,7	11,8	19,3	5,0	4,4		5,9		12,1	11,8
Transporte en vías principales y secundarias*	85,7	85,7	69,2	93,3	94,5		93,3		87,9	83,9
Total	100	100	100	100	100		100		100	100
Total (ton/año)	2.877	2.398	39.356	239	14.146		125.727		2.114	10.401.297

* Datos provenientes de simulación MODEM 2010

Fuente: Elaboración propia en base a resultados de la tabla 10 del informe Actualización y Sistematización del Inventario de Emisiones Contaminantes Atmosféricos en la Región Metropolitana, USACH, 2014.

La contaminación del aire en zonas urbanas es un problema que continuará siendo un tema central de política pública en el mediano y largo plazo. Como se ha mencionado, existe una

¹² Según sus mediciones, el incorporar el efecto de la re-suspensión, el aporte del transporte al nivel de material particulado aumentaría en torno al 50%.

estrecha relación entre el desarrollo de las ciudades—y por tanto de un país—y el transporte urbano, y mientras la fuente energética primaria para suplir el transporte sean los hidrocarburos, la contaminación proveniente del transporte urbano será importante. A nivel global, y en particular en las naciones desarrolladas, se está avanzando en el desarrollo e implementación de mejores soluciones de transporte, tales como la renovación del parque automotriz por vehículos eléctricos o pila de hidrógeno, la implementación de sistemas de transporte cooperativos, como por ejemplo el “carsharing” en sus diferentes modalidades, o la mejora de las redes de transporte público. Entre estas medidas, destaca el desarrollo del concepto de “Planes de Movilidad Urbana Sustentable” (SUMP por sus siglas en inglés) desarrollado en la Unión Europea, la cual establece los lineamientos para la mejora y el desarrollo de nuevos planes de transporte urbano con foco en las personas y el entorno (Wefering et. al, 2014). Sin embargo, estos cambios son costosos y complejos, por lo que su implementación y resultados son a largo plazo.

Es importante, tener presente que, aunque se eliminen las emisiones de contaminantes provenientes del transporte urbano—o de cualquier otra fuente—, sus efectos seguirán estando presentes en el mediano plazo, e incluso en el largo plazo. Primero, esto se debe a que algunos de los efectos que tienen los contaminantes sobre el organismo son acumulativos y/o irreversibles, tales como las enfermedades respiratorias crónicas o el cáncer de pulmón, y segundo, están los efectos que tienen los contaminantes sobre los sistemas del planeta. En esta dimensión destacan los contaminantes que además son GEI. Los GEI en general se caracterizan por tener un largo tiempo de vida en la atmósfera, siendo los principales el NH_4 con una duración media entorno a los 15 años, el N_2O con una vida media de 121 años y los gases fluorados que pueden permanecer en la atmósfera por miles de años¹³. Es importante destacar que el CO_2 no se destruye con el tiempo, sino que circula entre los sistemas de la atmósfera, la tierra y los océanos, lo cual genera que parte del exceso sea absorbido de la atmósfera rápidamente y otra fracción pueda permanecer por miles de años en la atmósfera¹².

Los dos puntos anteriores hacen necesario que, junto con políticas de largo plazo destinadas a solucionar el problema de la contaminación del aire, se implementen medidas de contingencia, de impacto inmediato o de corto plazo, para controlar y aminorar los niveles y efectos de la contaminación. Como ya se mencionó, con este objetivo nació la restricción

¹³ EPA. Climate Change Indicators: Greenhouse gases. Recuperado de: <https://www.epa.gov/climate-indicators/greenhouse-gases>.

vehicular en Chile, pero a pesar de su éxito inicial, se hace necesario reevaluar la idoneidad de esta medida desde una perspectiva ambiental, y plantear un rediseño o el desarrollo de una nueva política más adecuada. Con el marco y modelo desarrollado a continuación, se busca aportar a esta discusión, al evaluar el impacto que ha tenido la restricción vehicular sobre la calidad del aire en sus diferentes actualizaciones.

5. Marco teórico

La polución del aire es un fenómeno particularmente complejo de modelar, ya sea desde la perspectiva de su emisión, de su comportamiento en la atmósfera—o en los sistemas del planeta en general—, de su impacto sobre el ser humano y el planeta, o de su solución. Esto se debe a la gran cantidad de factores naturales y antrópicos que actúan en cada una de sus fases, los cuales interactúan en formas altamente complejas. A pesar de estas dificultades, se han desarrollado múltiples modelos para cada una de las dimensiones de la polución atmosférica, y en particular para la polución proveniente del transporte urbano.

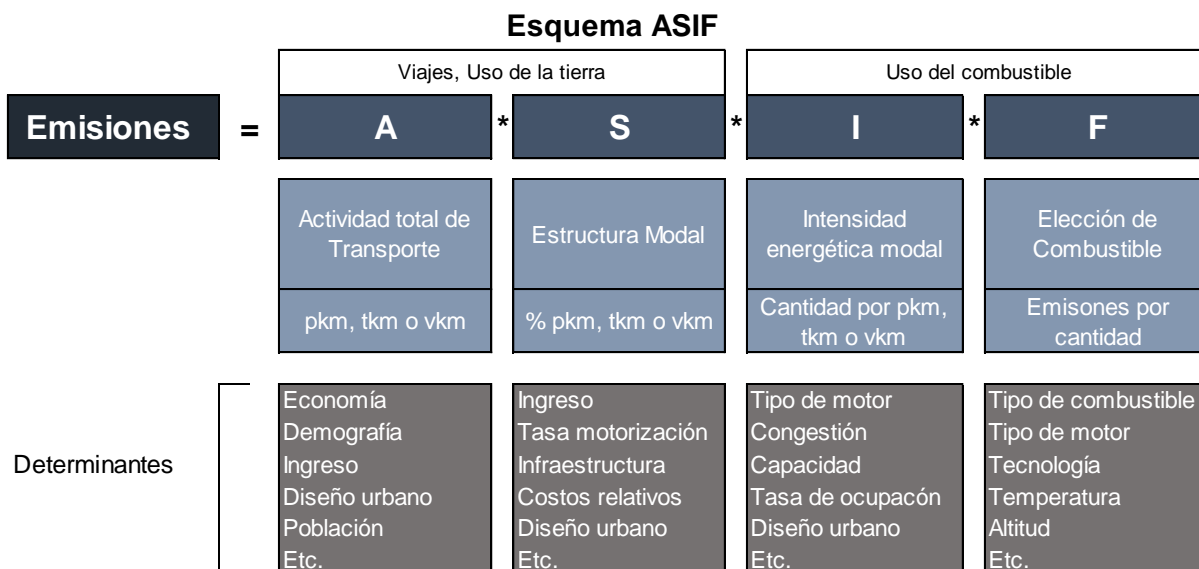
5.1 Modelos de la emisión y comportamiento de la polución atmosférica proveniente del transporte

5.1.1 Modelo de emisión de polución

Los modelos de emisiones buscan modelar los procesos y factores involucrados en la emisión de contaminantes provenientes del transporte y su liberación a la atmósfera. Estos modelos se limitan a predecir la magnitud de las emisiones. Si bien se han desarrollado diversos modelos, actualmente el dominante es el enfoque ASIF desarrollado por Schipper, Marie-Lilliu y Gorham (2000). El marco original creado por Schipper et. al (2000) fue desarrollado para estudiar el consumo energético del transporte, pero fue extendido para estudiar las emisiones de GEI, particularmente de CO₂. La versión del marco ASIF para evaluar GEI's, también es utilizado para evaluar contaminantes locales (Zegras, 2007). El marco ASIF descompone las

emisiones del transporte (E) en función de la actividad total del transporte (A), la estructura modal (S), la intensidad energética (I) y el combustible (F).

Figura 1: Factores que afectan las emisiones de polución del transporte.



Fuente: Zegras (2009).

La actividad del transporte (A) es el total de la demanda de transporte estudiada, la cual suele separarse entre pasajeros y cargas, expresándola en pasajeros—kilómetro (PKM) y toneladas—kilómetro (TKM) respectivamente, o bien, el global se puede expresar en vehículos—kilómetro (VKM)¹⁴. La actividad del transporte está determinada por diversos factores económicos, geográficos, demográficos, espaciales, etc., así, por ejemplo, un aumento de la población incrementa el PKM y mayor actividad económica aumenta el TKM. La estructura modal (S) está determinada por la proporción respecto al total de viajes que tienen los diferentes modos de transporte disponibles, tales como vehículo privado, colectivos, taxis, etc., y los distintos tipos de vehículos, tales como automóviles, motocicletas, camiones, etc. La elección del medio de transporte está determinada por múltiples factores, tales como, su disponibilidad, la

¹⁴ El PKM se calculan como la suma de la distancia recorrida en kilómetros por cada persona. El TKM se define como el movimiento de una tonelada de carga sobre la distancia de 1 kilómetro, y se calcula multiplicando la carga de un vehículo en toneladas por la distancia transportada. El VKM se calcula multiplicando la cantidad de vehículos en una vía por la distancia media recorrida en kilómetros.

renta, lo costos relativos, la infraestructura, factores conductuales, etc. La intensidad energética (I) es la cantidad de energía consumida por unidad de viaje (PKM, TKM o VKM). La intensidad energética depende de la eficiencia energética del vehículo, el uso de la capacidad del vehículo y la “Optimalidad”, lo cual se refiere al uso óptimo del vehículo y de la infraestructura en la que opera. También depende de las características y condiciones de conducción. El combustible (F) se refiere al tipo y características del combustible utilizado por los vehículos. Se define en términos de un factor de combustible – por ejemplo, CO₂/litro –.

5.1.1.1 Vehículos y sus emisiones

Los vehículos livianos son una de las fuentes principales de emisiones de polución en zonas urbanas y el principal contribuidor del sector transporte. Por las características intrínsecas de los vehículos a combustión interna, sus emisiones varían notablemente según sus características técnicas, el tipo de combustible, la geografía urbana y las condiciones del tráfico. Comprender esto, permite determinar mejor los efectos que tendrán diferentes medidas ambientales dirigidas a reducir la polución de las fuentes móviles urbanas.

Las emisiones de contaminantes de los vehículos se clasifican en tres tipos: emisiones provenientes del sistema de escape, emisiones por abrasión y emisiones evaporativas (EEA, 2016a; International Energy Agency, 2016). Las emisiones del sistema de escape provienen del proceso combustión del combustible que se realiza en el motor del vehículo¹⁵; son la principal componente de las emisiones de un vehículo. Las emisiones por abrasión son producto de la corrosión y abrasión mecánica de las partes del vehículo, y contribuyen principalmente a las emisiones de MP. Las emisiones evaporativas son producto principalmente de la fuga de vapores desde el sistema de combustible. También pueden provenir desde otros sistemas de fluidos del vehículo, como, por ejemplo, el sistema de frenos o de aire acondicionado. Contribuyen principalmente a las emisiones de VOC, y la fuga de vapores puede ocurrir aun cuando el vehículo no se encuentre en funcionamiento. A continuación, se desarrollan brevemente los principales factores que afectan las emisiones de los vehículos.

¹⁵ Un proceso de combustión perfecto solo produce H₂O y CO₂. Los demás contaminantes son producto de un proceso imperfecto de combustión.

(A) Uso excesivo del vehículo. La intensidad del uso del vehículo es un factor central en las emisiones totales del transporte. Estudios en países en desarrollo, muestran que el incremento del uso del vehículo ha aumentado significativamente las emisiones de CO₂, o ha neutralizado la reducción potencial de CO₂ producido por el avance tecnológico. Un factor importante a considerar es que el uso del vehículo y la actividad económica están estrechamente relacionados, de lo cual surge la incógnita de hasta qué punto es deseable limitar el crecimiento del uso del automóvil (Gorham, 2002).

(B) Antigüedad del parque automotriz y de la tecnología utilizada. Los vehículos más antiguos están asociados a un mayor nivel de emisiones de contaminantes locales y de GEI, respecto a vehículos nuevos, debido a que el rendimiento se deteriora con el tiempo, y porque en general, vehículos antiguos utilizan tecnologías obsoletas más contaminantes (Gorham, 2002).

(C) Mantenimiento inadecuado del vehículo. El deterioro de las emisiones de un vehículo está estrechamente relacionado a las prácticas de mantenimiento de su dueño. Así, por ejemplo, el uso de un combustible inadecuado en vehículos con convertidor catalítico puede dañar el sistema de escape de gases, incrementando las emisiones del vehículo (Gorham, 2002). Una mala mantenimiento del vehículo en general puede aumentar las emisiones, ya sean del sistema de escape, valorativas o de abrasión.

(D) Tipo de combustible. La composición y volumen de las emisiones de los vehículos varían notablemente en función del combustible que utilicen. Los estudios indican que vehículos que utilizan gasolina, en promedio, emiten mayor cantidad de CO y HC_s, mientras que los vehículos que utilizan diésel emiten mayor cantidad de NO_x y MP (Elliott, Nebel & Rounds, 1955; EEA, 2016a). Dai, Ge, Lin, Su y Liang (2013), encuentran que el uso de M15¹⁶ reduce las emisiones de Hidrocarburos totales (THC) y de CO en un 16% y 7% respectivamente, a la vez que aumenta en un 85% las emisiones de NO_x y duplica las emisiones de Formaldehído.

(E) Condiciones y estilo de conducción. El cómo se conduce y el contexto en el que se realiza, afectan las emisiones. Elliot et. al. (1955) muestra que las emisiones de CO¹⁷ y Formaldehído son mayores cuando un vehículo a gasolina esta al ralentí o desacelerando y disminuyen cuando acelera o está a velocidad crucero, mientras que lo contrario ocurre con el

¹⁶ El M15 es un combustible que posee un 85% de gasolina y un 15% de etanol por volumen.

¹⁷ Durante las fases de desaceleración y ralentí, la mezcla combustible-aire en el motor tiene un déficit de oxígeno, lo que produce una combustión menos eficiente.

NO_x¹⁸. Zhang, Batterman y Dion (2011) encuentra que las emisiones de CO, HC y NO_x de vehículos livianos son más altas cuando el tráfico está disminuyendo desde libre circulación hacia un atasco—o viceversa—, comparado a las condiciones de libre circulación o de hora peak; pero, las emisiones en hora peak duplicarían a las observadas en libre tráfico. Rosqvist (2003) encuentra que cada kilómetro circulado por calles amplias añade menos consumo de combustible y emisiones de contaminantes comparado a cada kilómetro circulado por calles estrechas.

(F) Calidad del combustible. La pureza, octanaje y otras cualidades del combustible afectan las emisiones. Kalligeros et al. (2003) muestra que un mayor porcentaje de olefinas¹⁹ en la gasolina, incrementa las emisiones de NO_x, mientras que el contenido de sulfuro, incrementa las emisiones de HC_s. CONCAWE (2004) encuentra que una reducción de la volatilidad de la gasolina incrementa las emisiones de HC, pero puede reducir las de CO. Bontoft et. al. (2016) muestra que un menor octanaje de la gasolina disminuye el rendimiento del vehículo y aumenta las emisiones de CO y HC en la fase de aceleración.

Es importante resaltar la brecha existente entre las emisiones homologadas por los fabricantes y las emisiones producidas en condiciones reales de conducción. Esta discusión se ha intensificado a raíz de las recientes sentencias, acusación e investigaciones a diferentes fabricantes, como, por ejemplo, Volkswagen, el grupo PSA (Peugeot y Citroën), Ford, el grupo Fiat-Chrysler o General Motors, por falsear los datos de emisiones de contaminantes y consumo de combustible de sus vehículos. Un estudio hecho por el Departamento de Transporte del Reino Unido (2016), comparó las emisiones de NO_x efectivas en condiciones de tráfico reales con las emisiones homologadas (ciclo NEDC), para un grupo de vehículos con norma Euro V y Euro VI representativos del mercado británico. El estudio encontró que las emisiones eran hasta 6 veces mayor a la establecida para el test de laboratorio NEDC oficial. Diversos estudios hechos en Alemania, España, Francia, Holanda, Suecia, Suiza y el Reino Unido (Tietge et. al, 2016), muestran que la brecha entre las emisiones de CO₂ y consumos reales en tráfico y los valores homologados, se ha incrementado con el tiempo, siendo la brecha más alta la encontrada en Holanda, con una diferencia de un 54% entre las emisiones de CO₂ efectivas y la establecida en los test de laboratorios.

¹⁸ En concordancia con la teoría termodinámica, que indica que una mayor temperatura de la cámara de combustión favorece la formación de NO_x.

¹⁹ Hidrocarburos con doble enlace carbono-carbono.

5.1.2 Modelos de comportamiento de emisiones en la atmósfera

Los modelos de calidad o de polución del aire, son herramientas usadas para describir y simular los procesos físicos y químicos que afectan a la polución atmosférica, en la medida en que se dispersan y reaccionan en la atmósfera (EPA, 2016). Estos procesos están determinados por la interacción que se produce entre las emisiones de contaminantes, la meteorología, las concentraciones atmosféricas, la deposición en el suelo y otros factores, por lo que un modelo de polución del aire en esencia describe la relación causal entre estos factores. (Daly y Zannetti, 2007).

Los modelos de polución del aire juegan un rol central en las ciencias y en la política pública. Para la ciencia, estos modelos permiten evaluar la relevancia relativa de los procesos importantes involucrados, así, *“estos modelos son el único método para cuantificar la relación determinística entre las emisiones y la concentración/deposiciones, incluyendo las consecuencias de escenarios pasados y futuros en la determinación de la efectividad de las estrategias de supresión”* (Daly y Zannetti, 2007). Esto convierte a los modelos en una herramienta esencial para la política ambiental, ya que permiten identificar la contribución de las diferentes fuentes de emisiones a los problemas de calidad del aire, y en base a esta información—y otras entregadas por estos modelos—, diseñar medidas eficaces para reducir las emisiones de contaminantes y su impacto sobre la salud humana y el medioambiente. Además, el poder predictivo de estos modelos permite estimar la efectividad futura de nuevas políticas o regulaciones (EPA, 2016).

Existen diversos tipos de modelos de polución del aire, pero los principales son:

Modelos de dispersión. Estos modelos son típicamente usados en el “permitting process” para estimar la concentración de contaminantes, en torno a receptores a un nivel específico del suelo, que estén rodeando una fuente de emisiones de contaminantes.

Modelos fotoquímicos. Estos modelos son típicamente usados en política ambiental para simular el impacto desde todas las fuentes emisoras, a través de la estimación de la concentración de contaminantes y deposiciones de contaminantes inertes y químicamente reactivos, sobre grandes regiones espaciales.

Modelos de receptor. Son técnicas observacionales que usan las características químicas y físicas de los gases y partículas medidas en la fuente y receptores, para identificar la presencia

de contaminantes y para cuantificar la contribución de las fuentes emisoras a las concentraciones a las que está expuesto el receptor.

5.1.2.1 La Meteorología y su impacto en la polución del aire

Los fenómenos atmosféricos que ocurren dentro de la Capa de Límite Atmosférico²⁰ (CLA) de la tierra, tienen una gran influencia sobre el destino de los contaminantes del aire (Grundström, 2015). Esto se debe a que una vez que los contaminantes son liberados a la atmósfera, su capacidad para transportarse, dispersarse y diluirse está determinado esencialmente por factores meteorológicos. Por esto, las características meteorológicas de la zona de estudio deben ser incorporadas a todo estudio de contaminación del aire.

A continuación, se caracterizan de forma breve, los principales fenómenos atmosféricos que afectan a los niveles de polución del aire.

Temperatura y radiación solar: la temperatura y radiación juegan un rol central en los procesos químicos asociados a la formación de ozono, de material particulado o smog fotoquímico (Shenfeld, 1970a; Shenfeld, 1970b). Mayores temperaturas en la superficie promueven la dispersión de los contaminantes, y la radiación está asociada al transporte vertical de contaminantes (Grundström 2015). La temperatura también afecta las emisiones de los vehículos (EPA, 2006).

Dirección y velocidad del viento: Vientos fuertes favorecen la dispersión de la polución, aunque en presencia de materia apilada en el suelo, provocan una re-suspensión de material particulado (Diab, n.f.). La dirección del viento afecta los niveles de contaminación de un área, cuando la fuente son emisores de chimeneas altas localizados cercanamente (Shenfeld, 1970a; Shenfeld, 1970b).

Turbulencias: Son fluctuaciones de alta frecuencia del viento que provocan la dispersión de los contaminantes. Las turbulencias pueden ser de origen mecánico o térmico. Las turbulencias mecánicas se producen por las asperezas del terreno, mientras que la térmica, se

²⁰ Se denomina Capa de Límite Atmosférico a la capa más baja de la Troposfera, la cual se caracteriza por estar fuertemente influenciada por la interacción con la superficie terrestre.

produce por el calentamiento de la superficie terrestre, lo cual genera remolinos (Shenfeld, 1970a; Shenfeld, 1970b).

Estabilidad: La estabilidad del aire es determinada por la tasa a la que la temperatura disminuye con la altura. Existe una condición neutral cuando, la temperatura decrece 1 grado Celsius por cada 100 metros. Se considera que el aire es inestable, cuando la temperatura decrece a una tasa mayor (Shenfeld, 1970a; Shenfeld, 1970b), lo cual favorece la dispersión de la polución.

Inversión térmica: Una inversión térmica se produce cuando la temperatura dentro de una capa de aire incrementa con la altura (Shenfeld, 1970a; Shenfeld, 1970b). La capa de aire caliente inhibe la formación de corrientes de aire ascendentes, provocando que las emisiones emitidas bajo esta capa queden atrapadas a nivel del suelo (Grundström, 2015). Existen 3 tipos de inversión (Shenfeld, 1970a; Shenfeld, 1970b):

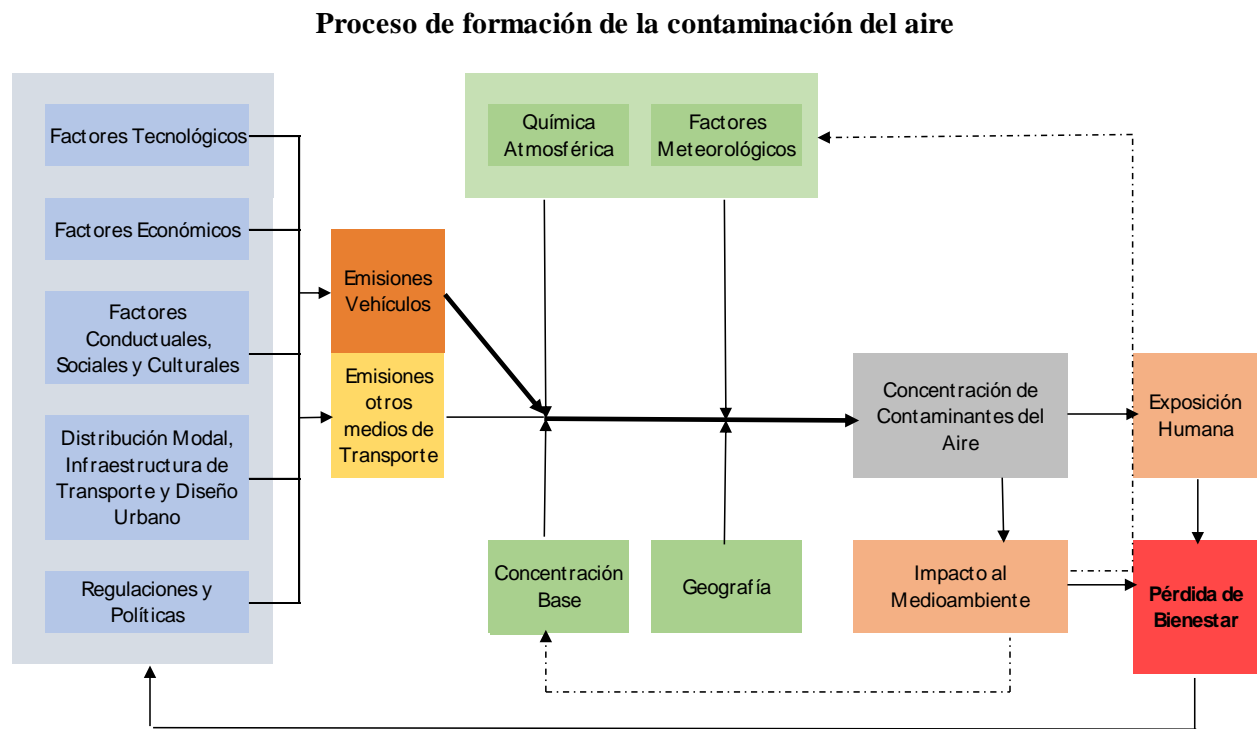
- **Inversión de radiación:** Es la más común, y ocurre durante noches claras, en las que el aire a nivel de la superficie se enfría más rápido que el de capas superiores. Se revierte durante la mañana cuando la luz solar vuelve a calentar la superficie.
- **Inversión de advección:** Se produce en zonas costeras o aledañas a grandes masas de agua, como lagos. Se produce porque durante el día, el aire de la superficie se calienta y asciende, el cual es reemplazado por aire frío, el cual fue enfriado por la masa de agua.
- **Inversión de subsidencia:** Ocurren a mayor altura, y se producen por el calentamiento de una masa de aire descendente. Está asociada a grandes áreas de baja presión y suele ser persistente.

Precipitaciones: Los contaminantes gaseosos se disuelven en la lluvia limpiando la atmósfera, o pueden actuar como núcleos de condensación de nubes. Esto convierte a la lluvia en un mecanismo eficiente de limpieza (Diab, n.f.). Si se disuelven sulfuros u otros contaminantes, se produce lluvia ácida.

Nubosidad: Durante el día, las nubes disminuyen la radiación solar, reduciendo la formación de corrientes de aire ascendentes. Durante la noche, previenen la pérdida de radiación infrarroja de la tierra, inhibiendo la formación de inversiones térmicas en la superficie. La reducción de

radiación solar también reduce la actividad de reacciones fotoquímicas. La contaminación se puede disolver en el agua de las nubes y caer con las precipitaciones, o bien puede volver a la atmósfera unido a la evaporación que forma las nubes (Diab, n.f.).

Figura 2: Interacción factores que participan en la formación y concentración de la contaminación del aire.



Fuente: Elaboración propia.

5.2 Política ambiental y la contaminación del aire

Desde su invención, el automóvil de combustión interna revolucionó la sociedad y el estilo de vida de los individuos, pero conforme transformaba al mundo e impulsaba el desarrollo social y económico, se fueron haciendo patentes los costos asociados a su uso. Por esto, el análisis económico del uso del automóvil requiere abordar el problema desde una perspectiva individual y social.

Desde la perspectiva individual, el automóvil suple las necesidades de transporte, la cual es una parte esencial de la vida de los individuos, ofreciendo beneficios y características únicas que no ofrecen otros medios de transporte. Entre estos beneficios están la flexibilidad y disponibilidad inmediata que otorga a sus usuarios, la protección que ofrece contra elementos del ambiente o el estatus social asociado a su posesión, solo por mencionar algunos. El beneficio individual que otorga el uso del vehículo claramente supera a sus costos individuales asociados, de lo contrario, los individuos optarían por otro medio de transporte.

Desde una perspectiva social, el análisis es más complejo, ya que es necesario incorporar la totalidad de beneficios y costos asociados al uso del vehículo. Esto implica que un beneficio individual positivo, no necesariamente se extiende al ámbito social. Esta diferencia entre la perspectiva social e individual se debe a que el uso del automóvil genera costos y beneficios, denominados externalidades, que afectan a individuos que no están involucrados en el uso directo del mismo, los cuales no son asumidos completamente por quien los está produciendo. Entre las externalidades que más impacto y preocupación generan, están, los accidentes automovilísticos, la polución del aire y la congestión vial.

La polución del aire proveniente del uso de los vehículos es un caso clásico de externalidad negativa o falla de mercado, en la que el individuo que la produce no asume la totalidad del costo asociado. En esta situación, el costo marginal social (CMgS) de la contaminación asociada al uso del vehículo es mayor al costo marginal privado (CMgP), lo cual genera una pérdida de bienestar económico, es decir, el equilibrio alcanzado por el mercado es sub-óptimo—ver anexo 1—.

El Ente regulador o creador de política pública, intenta corregir la falla de mercado que genera el resultado sub-óptimo, a través de regulación o política medioambiental que genere la internalización de los costos sociales externos, cuyo objetivo último, es alcanzar el nivel óptimo de contaminación. El nivel óptimo de contaminación se produce cuando el costo marginal de las medidas de control de la polución del aire iguala al costo marginal del costo social de dicha polución, o gráficamente, en el punto de intersección entre la curva de costo marginal social y la curva de beneficio privado del emisor de la contaminación—ver anexo 1—(Ap EnvEcon, 2009).

Existen un amplio rango de herramientas o medidas que el Ente regulador puede aplicar para corregir el mercado y alcanzar un nivel de contaminación óptimo socialmente. Estas

medidas pueden ser vistas a un nivel estratégico, táctico, o individual de cada medida. Además, se pueden clasificar en función de características o criterios particulares.

(A) El enfoque estratégico consiste en diseñar y seleccionar un set de medidas coherentes, las cuales, al ser implementadas en su conjunto, se potencian generando procesos sinérgicos para disminuir las emisiones de contaminantes. Gorham (2002) identifica 3 tipos elementales de estrategias, las cuales son: estrategias técnicas, estrategias sistémicas y estrategias conductuales. Las estrategias técnicas buscan reducir las emisiones producidas por los vehículos en circulación a través del cambio tecnológico, el cual puede ser a nivel de los vehículos que se utilizan para circular o a nivel de los combustibles que estos vehículos utilizan. Las estrategias sistémicas se enfocan en la red de transporte y buscan mejorar las condiciones de conducción de forma tal, que la circulación entre dos puntos se realice de la forma menos intensiva posible, en términos de emisiones de contaminantes y consumo energético. Las estrategias conductuales buscan reducir los viajes realizados en vehículos, por medio de la implementación de modos alternativos de transporte y la modificación de la estructura de accesibilidad para grupos de la sociedad, a la vez que se reduce las necesidades de desplazarse o se modifican los costos asociados a viajar, todo esto, enfocándose en los patrones de comportamiento adaptativos futuros.

(B) El enfoque táctico soporta al enfoque estratégico, y consiste en identificar posibles intervenciones enfocándose en quien puede ser influenciado. Identificar qué grupos son más susceptibles a cambios conductuales producto de la implementación de una medida específica, la magnitud de este cambio, y si este cambio conductual favorece o desfavorece la reducción de emisiones, es un aspecto esencial para evaluar y anticipar la efectividad de cualquier plan de descontaminación. Desde la perspectiva de los grupos objetivos de las medidas medioambientales, Gorham (2002) identifica los siguientes grupos tácticos: consumidores de combustibles, usuarios de vehículos, viajeros, operarios de vehículos, proveedores de vehículos, compradores de vehículos, dueños de vehículos y administradores de flotas, proveedores de combustibles, planificadores, consumidores de propiedades, y el público en general.

(C) Las políticas medioambientales pueden ser clasificadas según sus características, en políticas de orden y control (POC) o en instrumentos basadas en el mercado (IBM). Los instrumentos de orden y control son políticas medioambientales que se basan en regulaciones, mientras que los incentivos económicos buscan abordar las externalidades medioambientales

incorporando el costo externo de las actividades a través de incentivos financieros o económicos—como por ejemplo impuestos o derechos de propiedad—(glosario estadístico, OECD). Existen diversos argumentos—verídicos o hipotéticos—en favor y en contra de ambos enfoques. Entre estos, los más recurrentes son: que los instrumentos IBM son más eficientes que los POC en términos de costo unitario, que las IBM fomentan la evolución tecnológica – y otros efectos de largo plazo—, que las IBM son menos susceptibles a ser manipuladas por grupos de presión o poder en su diseño e implementación, que los individuos u organizaciones oponen mayor resistencia a las IBM que a las POC, y que las POC logran los objetivos ambientales en menor tiempo (Harrington y Morgenstern, 2004; Swaney, 1992). En general, los economistas favorecen la implementación de políticas basadas en el mercado frente a políticas de orden y control, aunque existe consenso de que para que las IBM sean efectivas, es necesario contar con una institucionalidad y un marco regulatorio fuerte y estricto (Swaney, 1992).

5.2.1 La restricción vehicular

La restricción vehicular es una estrategia de gestión de la demanda por viajes o vías de circulación, bajo la cual, normalmente en base al número de patente de los vehículos, se restringe el uso de vías de circulación o el acceso a zonas concretas durante un rango de tiempo concreto, con el fin de reducir las externalidades—particularmente la contaminación del aire y la congestión—producidas por la circulación de los vehículos. En términos generales, su implementación como política medioambiental es la siguiente: condicional a la normativa de niveles de contaminantes admisible, la autoridad pertinente define la reducción del tráfico vehicular necesario para disminuir la contaminación bajo un umbral objetivo. Para lograr la reducción de tráfico vehicular necesaria, la autoridad define y aplica el criterio de restricción—como por ejemplo el número de dígitos de la patente, o la cantidad de sellos—adecuada al objetivo. Finalmente, el organismo responsable—generalmente la policía de tránsito—vela porque se cumpla la medida. Un supuesto clave implícito en el mecanismo de acción de la medida es que asume que la totalidad de los individuos que se ven afectados por la medida no realizarán viajes, o bien, reemplazarán el automóvil por otro medio de transporte que no produce una compensación importante de la reducción de emisiones esperada de los vehículos inhabilitados de circular.

5.3 Modelo teórico

Zhang, Lawell y Umanskaya (2017) desarrollaron un modelo teórico de la restricción vehicular basada en el número de patente, en el cual incorporan tres mecanismos conductuales: la sustitución inter-temporal de los viajes, la adquisición de un segundo vehículo y la sustitución por otro medio de transporte; los cuales pueden afectar la efectividad de la restricción vehicular como medida medioambiental, incorporando la posibilidad de que la restricción provoque un aumento de la contaminación neta. Otro aspecto relevante que incorpora el modelo es la heterogeneidad de los contaminantes del aire, para lo cual considera sus características en base a las fuentes de polución y a la química atmosférica de cada contaminante, añadiendo la posibilidad de que la restricción tenga un impacto heterogéneo sobre los diferentes contaminantes que conforman la polución del aire. En particular, utilizan información sobre el NO_x , O_3 , PM, SO_2 y VOC.

El modelo define a \mathbf{v}_i como los kilómetros—vehículo recorridos por un hogar i en el día d durante la hora t . Siendo \mathbf{v}_i el vector que contiene todos los $v_{i,d,t}$, el hogar recibe un beneficio $U_i(\mathbf{v}_i)$ y asume un costo $C_i(\mathbf{v}_i)$ del vector \mathbf{v}_i seleccionado – patrón de uso del vehículo—. De esta forma, la utilidad del hogar está dada por:

Los beneficios $U_i(\mathbf{v}_i)$ son cóncavos y los costos $C_i(\mathbf{v}_i)$ son convexos a \mathbf{v}_i , lo cual implica que $U_i(\mathbf{v}_i) - C_i(\mathbf{v}_i)$ es cóncava en cada elemento $v_{i,d,t}$. Esto quiere decir que la utilidad marginal de cada hogar de conducir un kilómetro-vehículo adicional en un día d en la hora t es decreciente. Adicionalmente, el total de kilómetros-vehículo viajados ($\sum_i \mathbf{v}_i$) por los hogares generan externalidades negativas —en este caso el foco es la polución—, cuyo costo es denotado por $\mathbf{C}(\mathbf{V})$.

En el ideal, conducir durante cada hora t del día d es cargado con una tarifa $\tau_{d,t}$ — por kilómetro-vehículo viajado, es decir, el valor de la tarifa iguala el daño marginal que ocasiona cada kilómetro-vehículo viajado en cada hora t de cada día d , lo cual lleva a que cada hogar elija un vector \mathbf{v}_i óptimo socialmente.

La restricción vehicular intenta acercarse al óptimo social prohibiendo el uso del vehículo a los hogares durante un set de días y horas definido, es decir, la restricción $\{i\}$ exige que para un set de días $\{d\}$ y de horas $\{h\}$. Luego, los hogares maximizan:

Donde λ_i es el multiplicador asociado a cada limitación impuesta por la restricción. Luego, las condiciones de primer orden para el óptimo con restricción están dadas por:

$$\frac{\partial L}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial L}{\partial y} = 0$$

Los autores formalizan los procesos de sustitución y las relaciones de daño provocado entre contaminantes, definiendo una serie de teoremas, lemas y corolarios. Adicionalmente, a partir de evidencia empírica de las características, comportamientos y procesos atmosféricos asociados a los contaminantes considerados, se establece un marco de la heterogeneidad del comportamiento de cada contaminante relevante—para mayor profundización del modelo, revisar Zhang et. al (2017)—.

A partir de su modelo teórico, la información de las fuentes y la química atmosférica de los contaminantes, Zhang et. al. (2017) formulan 10 hipótesis respecto al impacto de la restricción vehicular, lo cuales se resumen a continuación:

Tabla 7: Hipótesis del modelo teórico

Hipótesis	
1	Bajo ciertas circunstancias, debido a la sustitución, la compra de un segundo auto, el uso de modos alternativos de transporte, y/o la química atmosférica, es posible que la restricción aumente la polución del aire.
2	Cualquier incremento en circulación como resultado de la restricción, tendrá un menor impacto sobre el PM10 y SO2, y un mayor impacto sobre el CO y NOx.
3	Si el régimen fotoquímico es un régimen limitado de NOx, un incremento en NOx como resultado de un incremento en la circulación producirá un incremento de O3.

- 4 Si el régimen fotoquímico es un régimen limitado de NO_x, un incremento en NO_x como resultado de un incremento en la circulación puede reducir el O₃.
- 5 Si la restricción no limita la circulación en horas de la madrugada o el anochecer, induciendo una sustitución hacia circular en estos horarios, es posible que la restricción incremente los niveles de O₃.
- 6 Debido a la química atmosférica, si la restricción aumenta la circulación, es posible que esta produzca una disminución significativa del NO y un aumento significativo del NO₂, NO y O₃.
- 7 La restricción vehicular puede incrementar el flujo vehicular en horas sin restricción, el flujo total y la polución debido al fenómeno de sustitución.
- 8 La restricción puede incrementar la polución debido a la adquisición de un segundo vehículo.
- 9 La restricción vehicular puede incrementar la polución debido al uso de modos alternativos de transporte.
- 10 Si la restricción produce la adquisición de un segundo vehículo o el uso de modos alternativos de transporte, y si estos utilizan diesel en vez de gasolina, entonces el O₃, la ratio NO₂/NO y el PM₁₀ pueden incrementar, y si los vehículos diesel tienen instalada una trampa de partículas, el CO puede decrecer

Fuente: Zhang, Lawell y Umanskaya (2017).

6. Restricción vehicular y la calidad del aire

6.1 Evidencia empírica previa

Dado la extensa implementación que ha tenido la restricción vehicular en América Latina y China principalmente, hay diversas investigaciones que estudian su efectividad como medida medioambiental, en diferentes contextos. Zhang et. al. (2017) estudian el programa “pico y placa” implementado en Bogotá en 1998. La medida, ha sido actualizada en 4 ocasiones, y en su formato actual restringe la circulación de vehículos entre las 6:00 AM y las 8:00 PM. Los autores analizan el efecto de todas las versiones de la medida sobre las concentraciones de NO_x, NO₂, SO₂, O₃ y MP₁₀. Algunos resultados del estudio son: ninguna versión de la medida tuvo un efecto significativo sobre las concentraciones por hora de SO₂, mientras que varias versiones de la restricción incrementaron significativamente los niveles por hora de NO_x, NO₂, O₃ y MP₁₀.

Los autores atribuyen este fenómeno, a la adquisición de un segundo vehículo más contaminante para circular cuando el vehículo principal esté sujeto a restricción. Los autores también encuentran que varias versiones de la medida disminuyen la concentración media diaria y máxima de NO_x y CO , y que la concentración de O_3 incrementa en las horas previas y posteriores a la vigencia de la restricción, lo cual es consistente con que los conductores desplazan el horario de su movilización.

Davis (2008) estudia el plan “hoy no circula”, implementado en Ciudad de México en 1989, el cual restringe la circulación entre las 5:00 AM y las 10:00 PM en base a los últimos dos dígitos de la matrícula del vehículo. En su regresión MCO, Davis obtiene que la restricción incrementó las concentraciones de CO en un 30%, de Ozono en un 1% y de Dióxido de Azufre en un 17%. En su modelo de regresión discontinua, tampoco encuentra evidencia de que el plan haya contribuido a mejorar la calidad del aire. Al igual que lo observado por Zhang et. al. (2017) en Bogotá, Davis concluye que el aumento de la contaminación se debe a la adquisición de un segundo vehículo más contaminante y al desplazamiento de los viajes hacia las horas en que no rige la medida. Gallego et. al. (2013), desarrolla un modelo de diferenciación vertical y horizontal aplicado a decisiones de transporte, el cual utiliza para estudiar el impacto sobre la concentración de CO del plan “Hoy no Circula”. Sus resultados indican que, en el corto plazo, la concentración de CO disminuyó un 13% en hora peak y 9% fuera de hora peak, respectivamente. Sin embargo, encuentra que, en el largo plazo, la concentración de CO aumentó en un 11% y 9% en hora peak y fuera de hora peak, respectivamente. También encuentran, que, en el largo plazo, la concentración de CO en los fines de semana aumentó en un 20%. Finalmente, concluye que la medida fracasa en su objetivo de largo plazo, ya que no logra persuadir a los conductores para que utilicen alternativas de transporte, y más aún, termina fomentando la adquisición de un segundo vehículo, generalmente más contaminante.

Para el caso de Santiago de Chile, Mullins y Bharadwaj (2013), utilizaron una regresión DID MCO, para evaluar el impacto de la restricción vehicular en su formato de implementación del año 1997—previo a la implementación oficial del plan PPDA RM en 1998—, sobre la concentración de MP_{10} . Sus resultados muestran que la declaración de un Episodio por parte de la autoridad, sumado a todas las medidas que esto conlleva, llevan a una reducción de la concentración de MP_{10} de un 17% respecto al nivel esperado sin la declaración del episodio

crítico. De Grange y Troncoso (2011) estudian el impacto del PPDA RM sobre los flujos de transporte urbano. Los autores concluyen que la restricción permanente—autos no catalíticos—no tiene impacto alguno sobre el flujo vehicular, mientras que la restricción adicional—episodios críticos—reducen el flujo vehicular en un 5,5%, lo cual es muy inferior al 20% anticipado por la autoridad. Concluyen que estos resultados son producto de que un gran porcentaje de los conductores posee más de un vehículo, a que los conductores desplazan sus viajes fuera del horario de la restricción y a que un porcentaje no menor de conductores no respeta la restricción.

Fresard (1998), estudió el efecto de la restricción vehicular en Santiago, y concluyó que la medida tiene un efecto segregativo, producto que los conductores con la capacidad económica suficiente optaron por la adquisición y utilización de vehículos menos contaminantes que no son afectados por la restricción, o bien, un número importante de familias optaron por la adquisición de un segundo vehículo para evitar la restricción, el cual, generalmente es más antiguo y contaminante. Esto genera que los sectores más acomodados de la población se vean menos afectados. También concluye que el paso de una restricción de 2 a 4 dígitos no genera una reducción significativa del flujo vehicular, versus el 10% esperado por la autoridad, y que el paso de una restricción de 4 a 6 dígitos reduce el flujo vehicular en un 5%, versus el 20% esperado por la autoridad. Éste fenómeno se debe a las medidas que la población adopta para evitar la restricción, tales como la adquisición de un segundo vehículo o el no cumplir la norma.

Huang, Fu y Qi (2017), estudian el impacto de la restricción vehicular sobre la calidad del aire, específicamente sobre la concertación de CO, SO₂ y NO₂, en Lanzhou, China. Sus resultados indican que, en el corto plazo, la medida tuvo un impacto significativo sobre las concentraciones CO y NO₂, reduciendo, por ejemplo, la concentración de CO en un 16,67%. No se observa un impacto significativo sobre la concentración de SO₂. Por otro lado, no encuentran un efecto significativo sobre ninguno de los contaminantes en el largo plazo. Esto lo atribuyen a un comportamiento adaptativo de los conductores, lo cual incluye un mayor uso del vehículo fuera del horario de restricción o a la adquisición de un segundo vehículo, y a la actividad industrial pesada de la zona. Liu, Yan y Dong (2016), estudian el impacto del plan de restricción vehicular “Odd-Even” (OE) que se implementó entre julio y septiembre de 2008 por motivo de los Juegos Olímpicos de Beijing, y el programa “One Day Per Week” (ODPW), implementado en

Beijing, entre octubre de 2008 y enero de 2009, sobre la calidad del aire—específicamente concentración de PM_{10} —, y más específicamente sobre los efectos sobre la salud. Los autores encuentran que ambos planes redujeron sustancialmente los niveles de material particulado y su impacto sobre la salud. Por ejemplo, el plan OE estaría asociado a una reducción de un 46,9% y un 10,8% de las visitas ambulatorias al hospital por enfermedades respiratorias y visitas de emergencia por enfermedades respiratorias, respectivamente. También encuentran que el impacto de ambos planes es mayor durante temporadas frías. Los autores son cuidadosos al apuntar que su estudio es de corto plazo, por lo que no alcanza a capturar fenómenos como la compra de un segundo auto u otros comportamientos adaptativos, y que su estudio no incluye en el análisis otros contaminantes relevantes por limitaciones de información.

En vista de los resultados obtenidos por los diferentes estudios mencionados anteriormente, se hace aparente la existencia de un cierto patrón en el impacto que tiene la restricción vehicular sobre la polución del aire. El patrón, comenzaría con un importante impacto en el corto plazo desde la implementación de la medida, contribuyendo a reducir significativamente los niveles de polución del aire y su impacto sobre la salud. Sin embargo, en el mediano y largo plazo, entrarían en juego mecanismos de adaptación de los individuos, así como otros factores externos, los cuales merman e incluso revierte el impacto positivo inicial de la restricción vehicular.

7. Estrategia de identificación

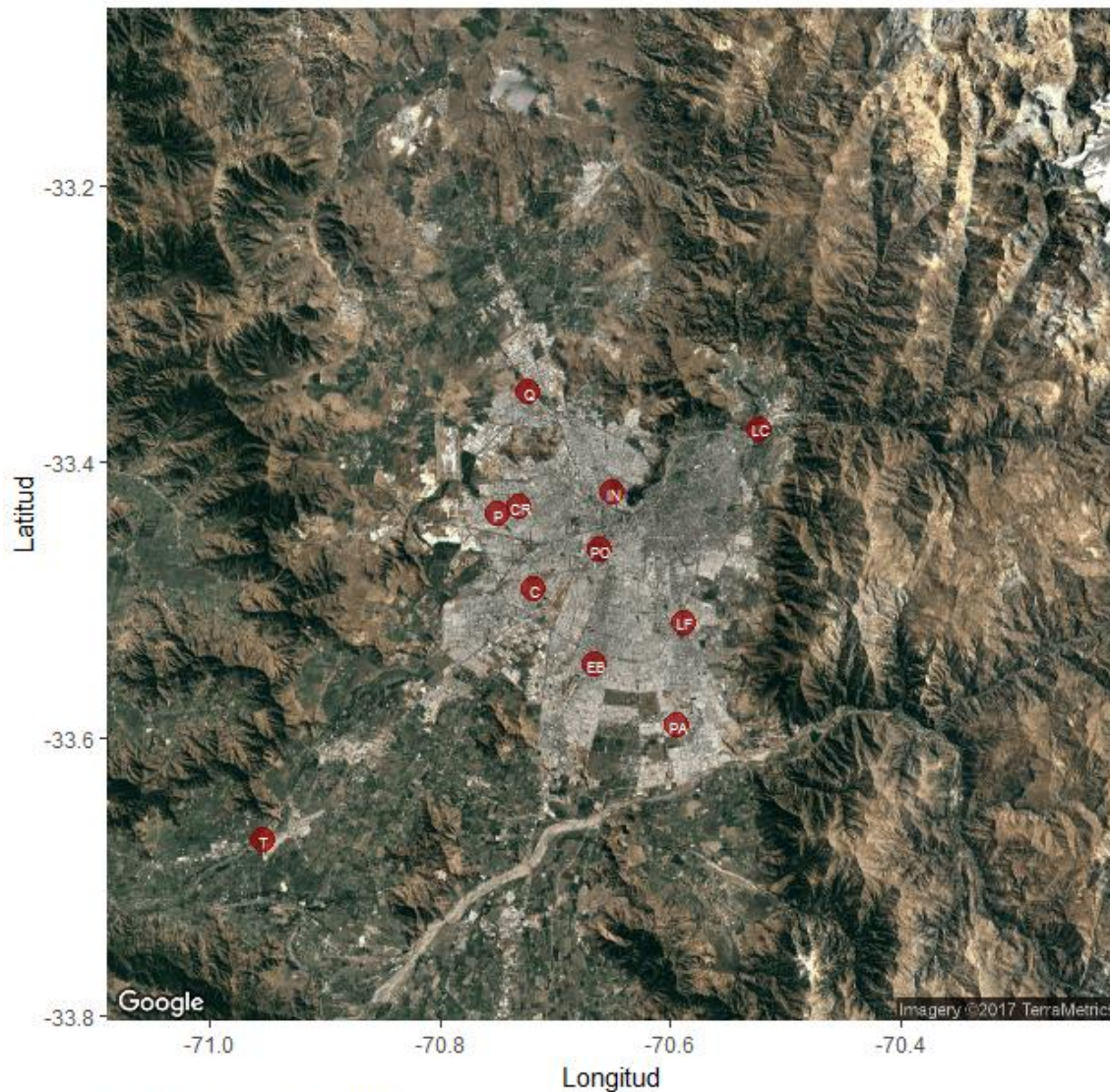
7.1 Datos

La información de los niveles de contaminación del aire se obtuvo la red de Monitoreo Automático de Calidad del Aire y Meteorología (MACAM), originalmente dirigida por el Ministerio de Salud, la cual fue establecida en 1989 (MACAM-I) y actualizada en 1997 (MACAM-II). Actualmente la red cuenta con 11 estaciones (MACAM-III), las cuales son administrada por el Ministerio de Medioambiente. La figura 3 muestra la ubicación de la red actual.

La red MACAM mide la concentración media horaria del SO₂, NO, NO₂, NO_x, CO, CO₂, CH₄, O₃, HCNM, MP₁₀ y MP_{2.5}. Adicional a la contaminación, desde 2003 la red MACAM mide variables meteorológicas, particularmente la temperatura ambiente, la humedad relativa del aire, la velocidad del viento y la dirección del viento. Esta información se encuentra disponible en el sitio web del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA). La información disponible corresponde a la concentración media diaria de los contaminantes atmosféricos, y la media horaria de las variables meteorológicas, datos que están disponibles para las redes MACAM 2 y 3 abarcando el periodo desde el año 1997 hasta la actualidad.

Figura 3: Ubicación geográfica de las estaciones de la red MACAM-III.

Red MACAM-III



Fuente: Elaboración propia.
Estaciones de la red MACAM-III: P= Pudahuel, PA= Puente Alto, Q= Quilicura, PO= Parque O'higgins, T= Talagante, CR= Cerro Navia, EB= El Bosque, IN= Independencia, LF= La Florida, LC= Las Condes y C=Cerrillos.

Dado que la información meteorológica registrada por la red MACAM no incluye la totalidad del periodo de tiempo estudiado, la información meteorológica utilizada fue obtenida del Centro Nacional de Datos Climáticos de los Estados Unidos (U.S. National Climate Data Center), y corresponde a las mediciones realizada por la estación ubicada en Quinta Normal. La información utilizada corresponde a la temperatura media diaria, las precipitaciones diarias, la temperatura de punto de rocío y velocidad media del viento.

Una de las variables meteorológicas más relevantes, la inversión térmica, no es medida directamente, sino que, como ya se mencionó anteriormente, se define a partir del perfil de estabilidad del aire. Siguiendo la recomendación de la Dirección Meteorológica de Chile, para identificar la presencia de inversión térmica se utilizó la información entregada por la red de radiosondas meteorológicas administrada por la Universidad de Wyoming, la cual mide variables meteorológicas a diferentes alturas, desde el nivel del mar hasta una altura de 28 kilómetros aproximadamente. Mediante la información de estas sondas se puede identificar la presencia de inversiones de subsidencia, las cuales son las que más afectan a Santiago en la generación de episodios ambientales críticos (Garreaud y Rullant, 2006).

Siguiendo las indicaciones de la Dirección Meteorológica de Chile, para identificar la existencia de una inversión de subsidencia en Santiago, se estudió el patrón de temperaturas desde alturas superiores a los 550 metros hasta los 1.400 metros. En particular, se utiliza la información de la radiosonda ubicada en Santo Domingo, la cual entró en funcionamiento en 1999. Para el periodo 1997-1999, se utiliza la información de la radiosonda que estuvo ubicada en Quinteros, la cual fue reemplazada por la radiosonda de Santo Domingo en 1999.

La información de los episodios críticos se obtuvo de la Subsecretaría de Transporte, la cual detalla la fecha del episodio crítico, el tipo de episodio y la restricción vehicular implementada. Esta información fue obtenida mediante el portal de transparencia del gobierno. Revisando la información recibida, se detectó que los datos estaban incompletos, por lo que, para verificar la información, se comparó con la información histórica que posee la Unidad Operativa de Control de Tránsito (UOCT), información que está disponible en su sitio web. La UOCT posee un registro que abarca desde el año 2003 hasta el presente, por lo que para verificar la información del periodo comprendido entre los años 1997 y 2002, se recurrió al diario La Nación. El diario La Nación es un periódico de publicación diaria, público-privado de circulación nacional, el cual informa de forma detallada la declaración de los episodios ambientales de Santiago. Para recabar dicha información, se recurrió al Registro de Medios Escritos de la Biblioteca Nacional de Chile,

Tabla 8: Sumario de variables.

Variable	Unidad	Observaciones	Media	Desviación			
				Estándar	Mínimo	Máximo	
CO	ppm	59.996	0,8792146	0,877449	0,0049597	11,2928	
NO ₂	ppb	31.197	22,56455	12,06615	1,3677	204,873	
NO	ppb	34.681	38,52946	47,22721	0	397,35	
NO _x	ppb	35.609	60,27537	55,8692	0	481,083	
MP ₁₀	ug/m3	61.136	71,74222	36,08582	0	404,021	
MP _{2,5}	ug/m3	42.134	29,25695	17,92626	0	193,167	
Velocidad Viento	m/s	62.284	5,947337	2,247916	0,8823529	16,5	
Temperatura	° C	62.284	14,83748	5,104787	2,430556	26,9213	
Temp. Pto. Rocío	° C	62.284	6,820826	3,255092	-7,384259	14,90741	
Precipitaciones	mm	62.319	0,2100209	2,549031	0	177,8	
Inversión Térmica (altura)	mts	48.941	21.25,25	3.048,813	516	19.020	
Inversión Térmica (dummy)	binaria	49.109	0,6729927	0,4691247	0	1	
IMACEC	índice	62.319	124,0031	26,22051	80,56	177,11	

Fuente: Elaboración propia.

7.1.1 Evidencia Previa

La figura 4 se detalla la evolución del promedio diario de los niveles de MP₁₀, CO, MP_{2,5}, NO, NO₂ y NO_x para el periodo comprendido entre los años 1997 y 2016. Para el MP₁₀ se observa una disminución de los niveles desde el año 1997 hasta mediados de la década del 2000's, periodo a partir del cual se observa un estancamiento en los niveles de contaminación.

Para el CO se observa una mejora sostenida de los niveles de contaminación desde el año 1997 hasta el año 2010, año desde cual se observa un estancamiento de esta tendencia. El patrón observado es consistente con la continua mejora que ha sufrido el parque automotriz chileno, y particularmente de la región metropolitana, gracias a la implementación de un estándar de emisiones exigente—normas Euro—, y un control más estricto de las emisiones del parque automotriz, entre otras medidas. El estancamiento observado a partir de 2010 puede ser causa del aumento del parque automotriz, y a que, bajo el marco actual, el parque automotriz tiene un menor margen de mejora—por ejemplo, a la fecha, sólo cerca del 6 % del parque automotriz de Santiago no posee convertidor catalítico—.

Para el $MP_{2.5}$ se poseen datos a partir del año 2000. Se observa una tendencia a la baja en los niveles de contaminación, tendencia que parece revertirse a partir del año 2013, desde donde se aprecia un aumento de los niveles máximos de contaminación, manteniendo un patrón de comportamiento global similar al MP_{10} , conforme a lo esperado.

Por último, para el NO y NO_x se disponen datos a partir del año 2001, y para el NO_2 a partir del año 2004. Ninguno de los óxidos de nitrógeno muestra una mejora apreciable en los niveles de contaminación, donde incluso el NO_2 parece haber empeorado en varios periodos.

Las tendencias de comportamiento de los niveles de los diferentes contaminantes parecen indicar una pérdida de efectividad de las medidas de descontaminación atmosférica de Santiago, con la excepción del CO , el cual parece mostrar una mejorar sostenida.

Figura 4: Evolución de los niveles medios diarios de contaminación, periodo 1997-2016.

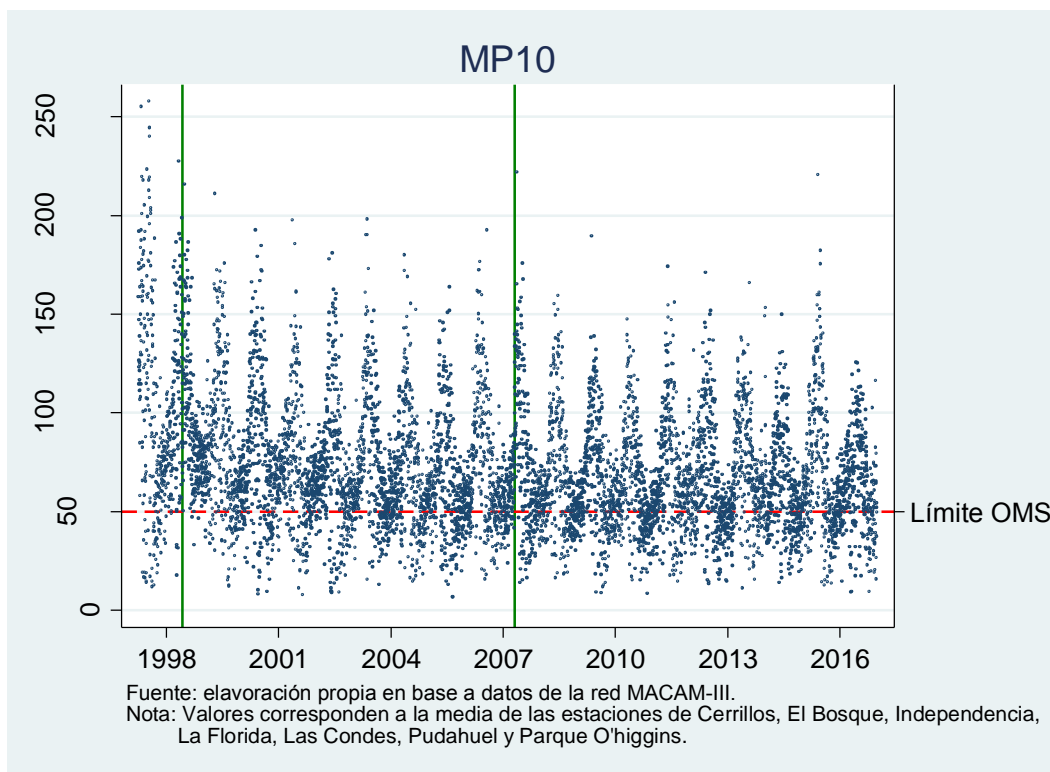


Figura 4: Continuación.

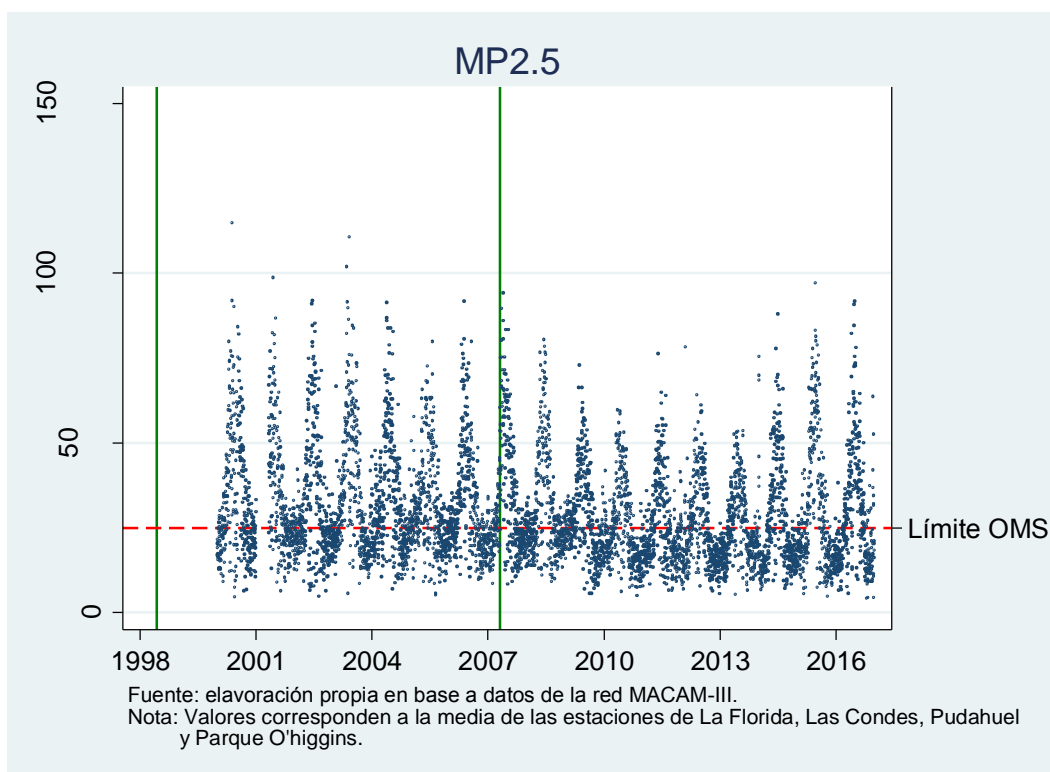
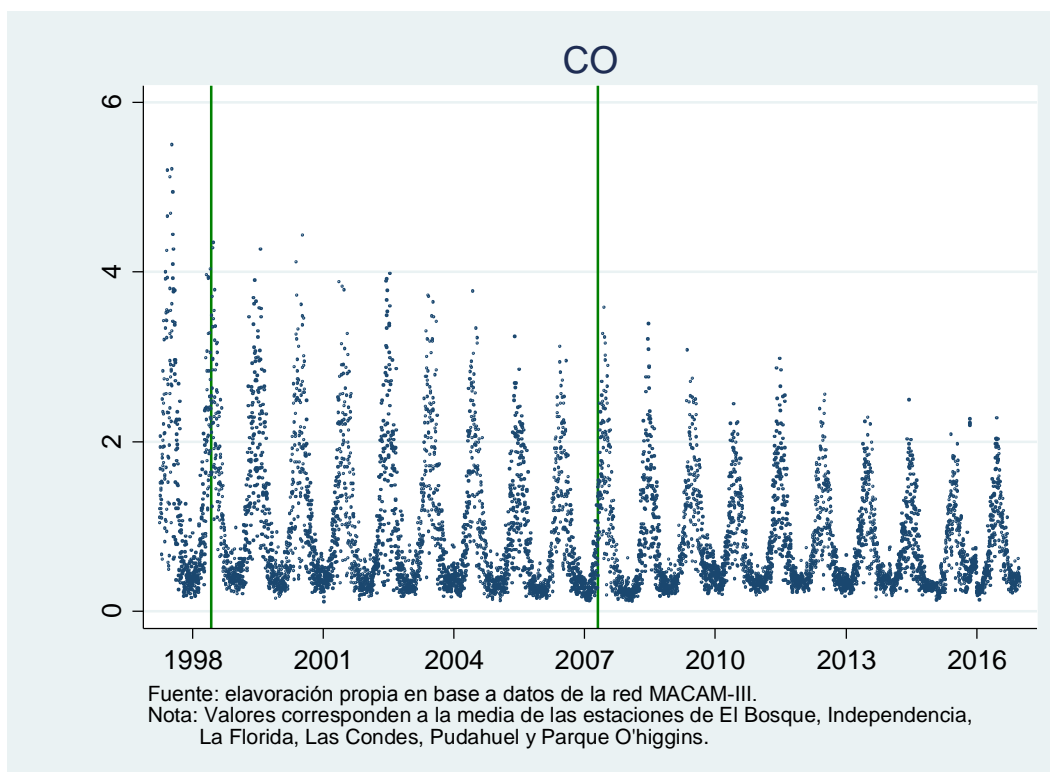


Figura 4: Continuación.

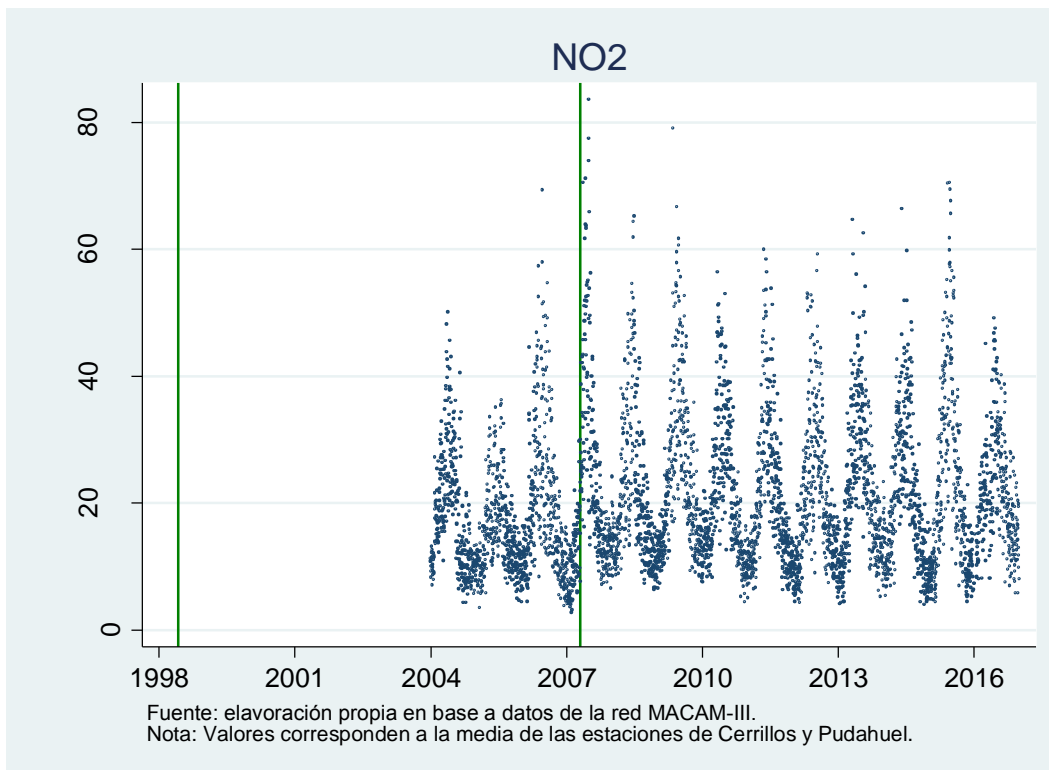
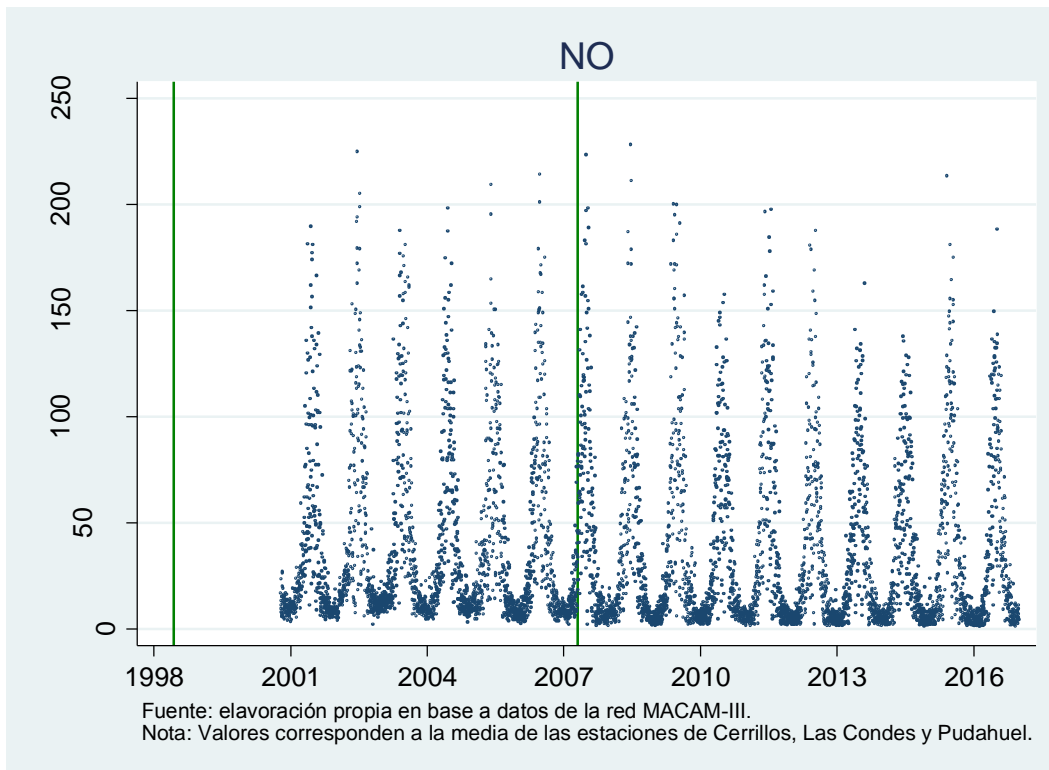
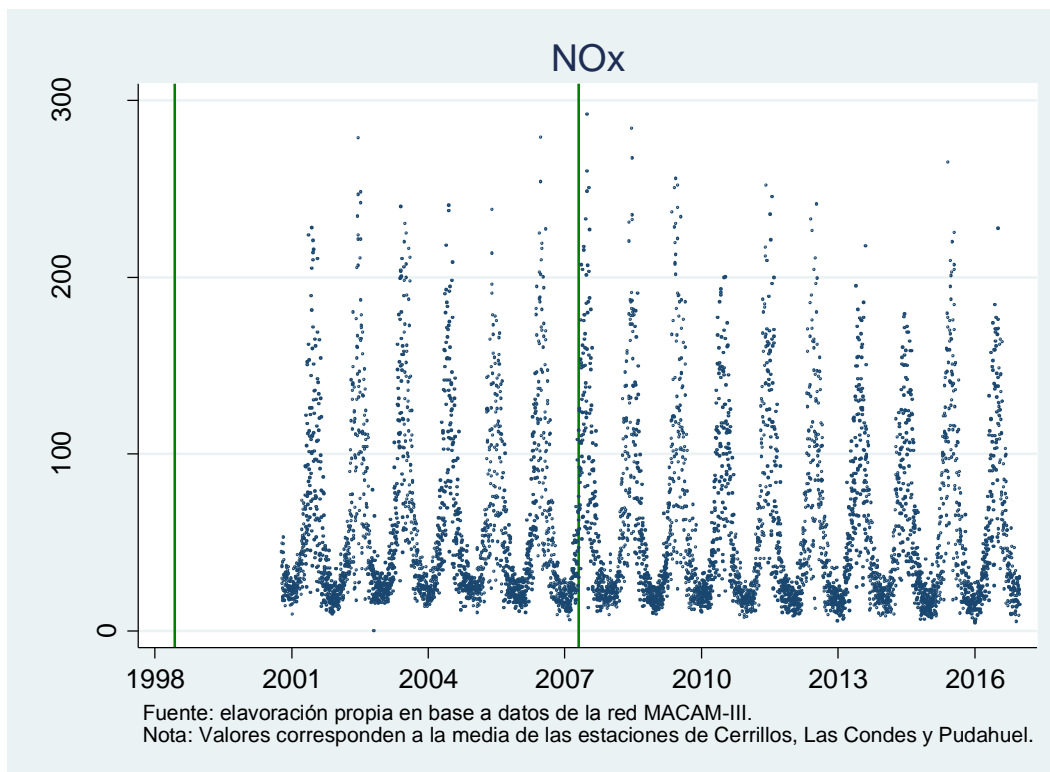


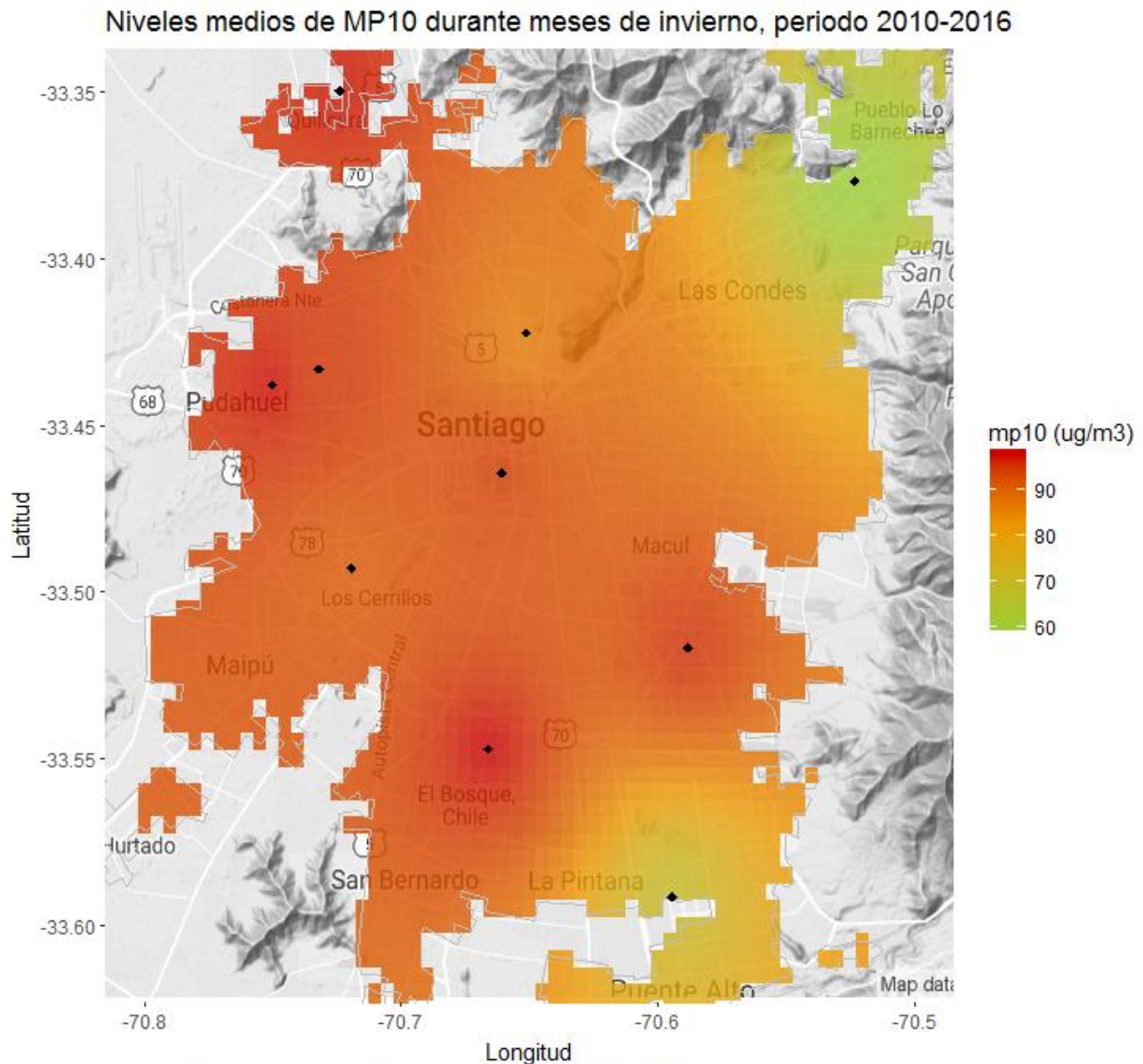
Figura 4: Continuación.



La figura 5 muestra la distribución geográfica de los niveles medios de MP10 durante los meses comprendidos entre abril y agosto, y entre los años 2010 y 2016. Este mapa permite apreciar las diferencias en el comportamiento de los niveles de polución del aire por material particulado sobre la superficie de Santiago, y así, identificar las comunas más afectadas.

La contaminación del aire tiene varias características particulares que la diferencian de otros tipos de polución. Dos de estas características particulares de la contaminación del aire son su alcance y comportamiento. La polución tiende a homogeneizarse dentro de un área de acción—en el caso de Santiago, la superficie ubicada bajo la capa de inversión térmica en los meses de invierno—, y extenderse por grandes áreas si las condiciones lo permiten. La tasa de homogenización y el alcance dependen del tipo de contaminante, pero en líneas generales, los gases—como el CO— tiende a homogeneizarse dentro de un área con mayor velocidad, alcanzan una menor concentración, y cubren mayores áreas, mientras que contaminantes sólidos o de mayor densidad —como el MP—, tiende a abarcar menores zonas y a tener áreas y tasas de homogeneización menores a la de los gases.

Figura 5: distribución geográfica de los niveles medios de MP10 durante los meses de abril a agosto, entre los años 2010 y 2016.

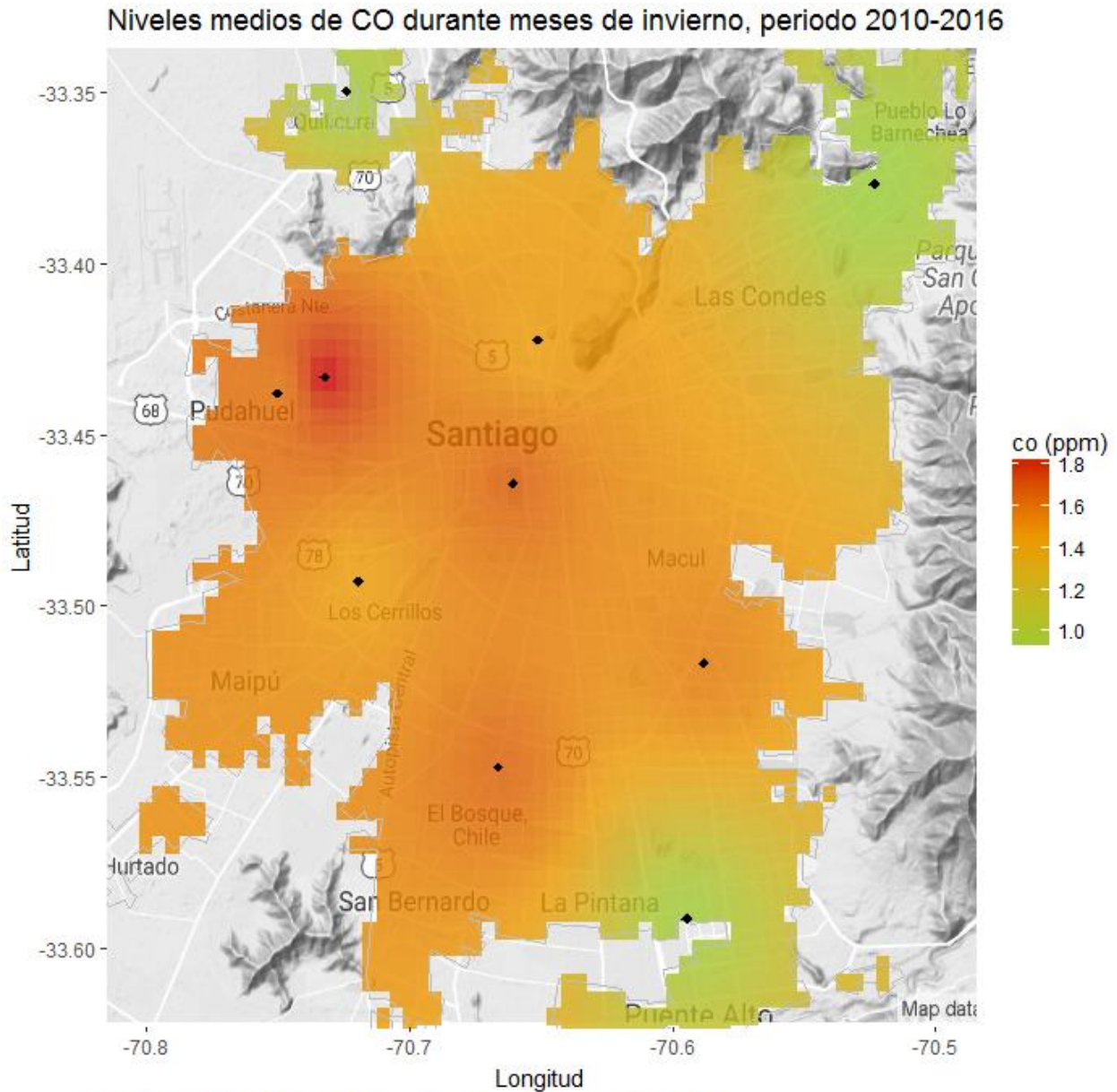


Fuente: Elaboración propia en base a datos de la red MACAM-III.

Del mapa se aprecia que en Santiago los niveles de MP10 tienden a ser similares, excepto por el sector oriente—Las Condes, Lo Barnechea y La Dehesa—el cual se encuentra a mayor altura, y, por tanto, una gran superficie de esta zona está por sobre la capa de inversión. A pesar de esto, existe una tendencia a que los peaks de contaminación se produzcan en las comunas del centro, y de la zona oeste—suroeste. En la zona centro, esto se debe a que existe una mayor densidad poblacional y de actividad económica, lo cual provoca que se concentre la circulación

de vehículos y de transporte público, elevando los niveles de contaminación. Los peaks de contaminación de la zona oeste y suroeste de Santiago se deben en gran parte a factores atmosféricos y geográficos.

Figura 6: distribución geográfica de los niveles medios de CO durante los meses de abril a agosto, entre los años 2010 y 2016.



Durante el invierno, las corrientes de aire circulan mayormente en dirección sureste. Al chocar con la Cordillera de los Andes, las masas de aire se devuelven en dirección sur—poniente transportando la polución hacia dicha zona, aumentando la concentración de polución, lo cual se ve agravado por la tendencia de la contaminación a decantarse en las zonas más bajas de la capital, las cuales se encuentran en la zona poniente de la ciudad. Otro factor importante es la ubicación de las industrias. En Santiago, la mayor concentración de industria se localiza en las comunas de Maipú, Quilicura y San Bernardo, las cuales están ubicadas en los sectores poniente o sur de la capital—Las Condes es la tercera comuna con mayor concentración de industrias, pero no se ve mayormente afectada por la polución, gracias a su ubicación privilegiada—.

La figura 6 muestra la distribución geográfica de los niveles medios CO durante el periodo comprendido entre los meses de abril y agosto, y entre los años 2010 y 2016. Se observa un escenario similar al del MP10, con niveles de CO relativamente similares al interior de la capital, observándose un peak en el sector de Pudahuel—probablemente influenciado por el Aeropuerto Internacional—. Una diferencia importante respecto a lo observado con el MP10 es que el sector de Quilicura posee en términos relativos, un bajo nivel de CO, a la vez que es una de las principales afectadas por el MP10. Esta situación puede ser causa de la alta concentración de industrias en la zona, pero un nivel comparativamente bajo de flujo vehicular

7.2 Modelo

Para estimar el efecto de la restricción vehicular sobre los niveles de contaminación de Santiago, se realiza una estimación mediante Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) y además se utiliza un diseño de restricción discontinua (RD)²¹, siendo la variable de selección—running

²¹ El diseño de regresión discontinua (RD) se utiliza para estimar el efecto causal de un tratamiento binario sobre algún resultado. En el diseño RD, las unidades reciben tratamiento en base a si el valor de una covariable de interés está por sobre o debajo un umbral conocido. El aspecto central de esta técnica es que la probabilidad de recibir el tratamiento salta de forma discontinua en el punto de corte —umbral—, induciendo una variación en la asignación del tratamiento que se asume no está relacionada con factores de que puedan generar confusión.

Para cada unidad de estudio i , se denota por Y_i a la variable que define el resultado de interés, y por X_i a la variable asignación—forcing variable—, la cual determina la asignación del tratamiento en base un umbral \bar{x} .

Definiendo $\{Y_i(0), Y_i(1), X_i\}_{i=1,2,\dots,n}$ a una muestra aleatoria de $\{Y(0), Y(1), X\}$, donde $Y(1)$ e $Y(0)$ denotan los resultados potenciales con y sin tratamiento, respectivamente, y la asignación del tratamiento está definido por la siguiente regla: la unidad i es asignada con el tratamiento si $X_i > \bar{x}$, y se le asigna el estatus de control si $X_i \leq \bar{x}$, donde el valor \bar{x} es fijo y conocido. Luego, el resultado observado es:

variable—el tiempo, y los umbrales, las fechas de implementación del PPDA—específicamente de la restricción vehicular—y sus sucesivas actualizaciones. Dado que posterior al umbral de tratamiento, la probabilidad del tratamiento no pasa de 0 a 1—la restricción vehicular solo se aplica entre abril y agosto, y en este trabajo se utiliza la información anual—, se utiliza un modelo RD fuzzy, el cual incorpora este aspecto al estimar los coeficientes.

En particular, la ecuación a estimar para la regresión OLS es:

(1)

Y la ecuación para el modelo RD es:

(2)

Donde $\ln(C_{p,t})$ es el logaritmo de la concentración media diaria entre estaciones del contaminante p medido en el tiempo t . X incluye covariables climáticas como la temperatura, humedad, velocidad del viento o precipitaciones, y una covariable económica—IMACEC—. X también incluye variables para el año, el mes y un indicador de fin de semana. D son *dummies* que toman valor 1 cuando la versión j de la restricción vehicular está vigente en el día t .

$f(t)$ es una función polinomial de tendencia temporal de grado q , siendo T el tiempo—variable de asignación—y c el umbral de asignación del tratamiento—la restricción vehicular—. Por último, ϵ es el término de error. Se incluyen polinomios de grado dos para las variables meteorológicas (Zhang, 2017) y su rezago (Davis, 2008).

El coeficiente de interés es β , el cual captura el impacto de las medidas de restricción en sus diferentes versiones, sobre la contaminación del aire en Santiago. La estimación mediante MCO de la ecuación (1) puede producir un estimador sesgado de β , por lo cual se utiliza además la metodología RD (2).

La muestra aleatoria observada está dada por: $\{D_{j,t} = 1\}$. Luego, el “average treatment effect” (ATE) al punto de corte, está dado por:

(Calonico, Cattaneo & Titiunik, 2014).

7.3 Resultados

La tabla 9 reporta las estimaciones MCO del efecto de la restricción vehicular en su conjunto —no se diferencia entre restricción permanente o la restricción adicional implementada en episodios críticos— sobre la polución del aire, particularmente sobre el nivel promedio de 24 horas, del promedio de MP10 y CO entre las estaciones. Para cada contaminante se reportan el coeficiente, los errores estándar—los cuales son robustos para heterocedasticidad y autocorrelación dentro de un cluster de 1 semana—, y la ventana de tiempo sobre la cual se realizó la estimación.

Comenzando con el análisis de la restricción vehicular (RV) en su formato de 1998, su efectividad se evalúa en las ventanas 1997-1999, 1997-2000 y 1997-2001. Para el periodo 1997-1999, los coeficientes para ambos contaminantes son negativos, donde la RV se asocia con una disminución de un 17% del CO y de un 8,2% del PM10. Sin embargo, para el CO el coeficiente es significativo al 1% mientras que para el PM10 el coeficiente es no significativo. Para el periodo 1997-2000 se observa una situación similar, donde la RV se asocia a una disminución de un 14% del CO y un 3,3% del MP10, y nuevamente, el coeficiente para el CO es significativo al 1% mientras que el coeficiente del PM10 no es significativo. Por último, para el periodo 1997-2001 los coeficientes para ambos contaminantes son negativos y no significativos.

Tabla 9: Efecto de la restricción vehicular sobre la polución: Mínimos Cuadrados

		Periodo					
		1997-1999	1997-2000	1997-2001	2006-2008	2005-2009	2004-2010
MP10	Restricción 1998	-0.0817 (0.0577)	-0.0332 (0.0540)	-0.0158 (0.0525)			
	Restricción 2007				0.0451 (0.0533)	0.124*** (0.0422)	0.133*** (0.0343)
CO	Restricción 1998	-0.172*** (0.0620)	-0.141*** (0.0535)	-0.0749 (0.0517)			
	Restricción 2007				0.204*** (0.0583)	0.102** (0.0473)	0.0377 (0.0399)

Nota: Resultados son robusto contra heteroscedasticidad y autocorrelación dentro de un cluster de 1 semana. Errores estándar en paréntesis: *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

La efectividad de la RV en su formato de 2007 se evalúa en las ventanas 2006-2008, 2005-2009 y 2004-2010. Para el periodo 2006-2008, el coeficiente para ambos contaminantes es positivo, donde el coeficiente asociado al CO es significativo al 1% e implica un aumento del nivel de polución de un 24%, y el coeficiente del MP10 no es significativo. Para el periodo 2005-2009, el coeficiente para ambos contaminantes es positivo y significativo – el PM10 al 1% y el CO al 5% -, los cuales implican un aumento del nivel del CO de un 10% y del PM10 de un 12%. Por último, para el periodo 2004-2010, nuevamente el coeficiente para ambos contaminantes es positivo. Sin embargo, sólo el coeficiente asociado al PM10 es significativo, el cual implica un aumento de un 13% del nivel de contaminación.

Los resultados de la regresión MCO indican que la implementación de la restricción vehicular en su formato de 1998 ayudó a mejorar la calidad del aire de Santiago respecto a la situación anterior, particularmente disminuyendo los niveles del CO, para los cuales los coeficientes para los periodos 1997-1999 y 1997-2000 son significativos al 1%. Para el caso del PM10 el resultado no es robusto, ya que, si bien indican una mejora de la contaminación, ningún coeficiente es significativo.

Para el formato de 2007 de la RV, las estimaciones MCO no muestran evidencia alguna de que haya contribuido a mejorar la calidad del aire respecto al formato de 1998 de la medida, y más aún, la actualización de la medida se asocia a un aumento de los niveles de contaminación, ya que los coeficientes son positivos, variando en significancia.

Tabla 10: Efecto de la restricción vehicular sobre la polución: Regresión Discontinua

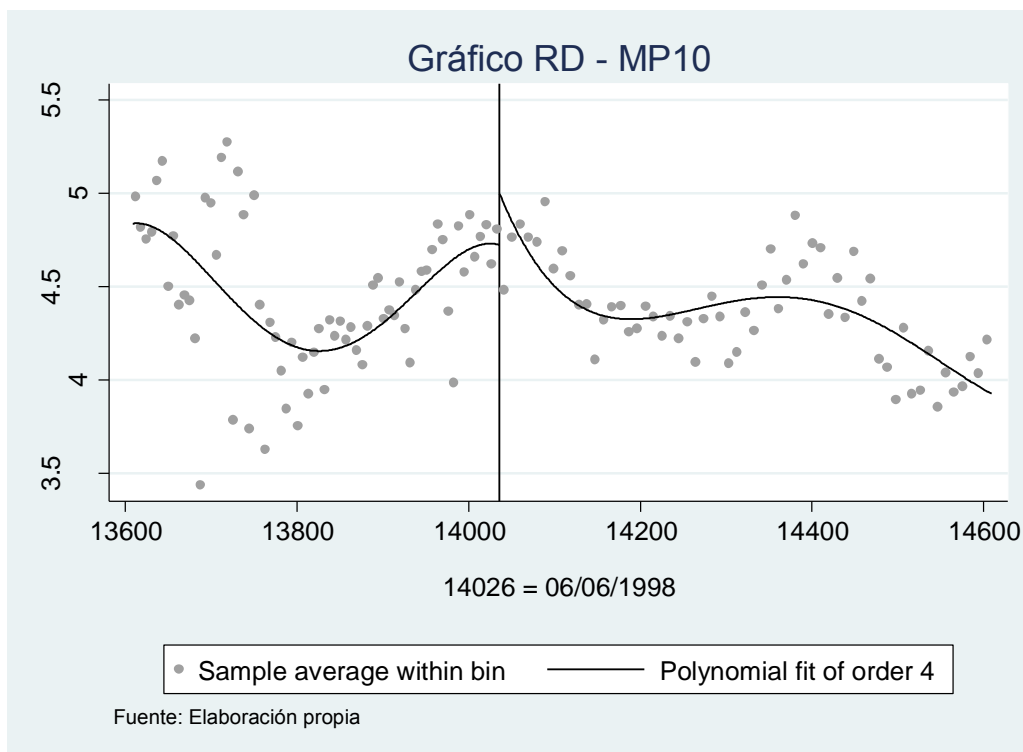
		Polinomio de tendencia de tiempo				
		1 th	2 th	3 th	4 th	5 th
MP10	Restricción 1998	-0.103*	-0.138*	-0.182**	-0.210**	-0.223**
		(0.0606)	(0.0703)	(0.0794)	(0.0911)	(0.112)
	Restricción 2007	0.349***	0.161**	0.236***	0.242***	
		(0.0712)	(0.0783)	(0.0768)	(0.0826)	
CO	Restricción 1998	-0.0527	-0.0933	-0.199**	-0.224**	-0.163
		(0.0610)	(0.0783)	(0.0878)	(0.0903)	(0.125)
	Restricción 2007	-0.478***	-0.318**	0.251***	0.288***	
		(0.174)	(0.158)	(0.0803)	(0.0836)	

Resultados son robusto contra heteroscedasticidad y autocorrelación dentro de un cluster de 1 semana. Errores estándar en paréntesis: *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1.

La tabla 10 muestra los resultados de las estimaciones hechas con la metodología de regresión discontinua (RD) sobre el impacto de la RV en la contaminación del aire. Para cada contaminante se reportan los coeficientes y los errores estándar, los cuales son robustos para heterocedasticidad y autocorrelación dentro de un clúster de 1 semana. Para cada contaminante y versión de la restricción, se realizaron estimaciones con tendencia de tiempo polinomial desde grado 1 hasta grado 5²².

Para la versión de 1998 de la restricción vehicular, los coeficientes son negativos para todas las especificaciones y contaminantes. En particular, para el PM10, los valores del impacto sobre la contaminación del aire van desde una reducción del 10% para la especificación con polinomio de grado 1, hasta un 22% para la especificación con polinomio de grado 5, siendo todos los coeficientes significativos. Para el caso de CO, las especificaciones con polinomios de grado 3 y 4 son significativas al 5%, con coeficientes de -0.199 y -0.244 respectivamente, mientras que el resto de especificaciones son no significativas.

Figura 7: Gráfico de la regresión de diseño de regresión Discontinua.



²² Para el formato de la restricción del año 2007, sólo se realizaron regresiones con polinomios de hasta grado 4, debido a limitaciones del paquete estadístico y hardware utilizado.

Figura 7: Continuación.

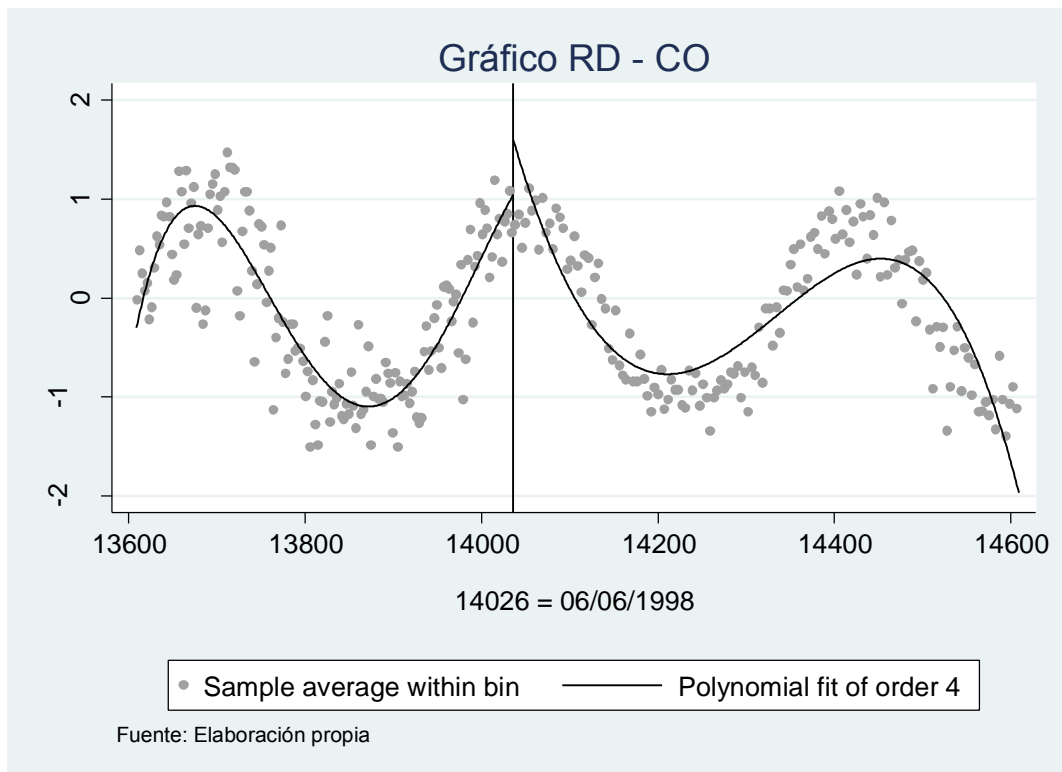
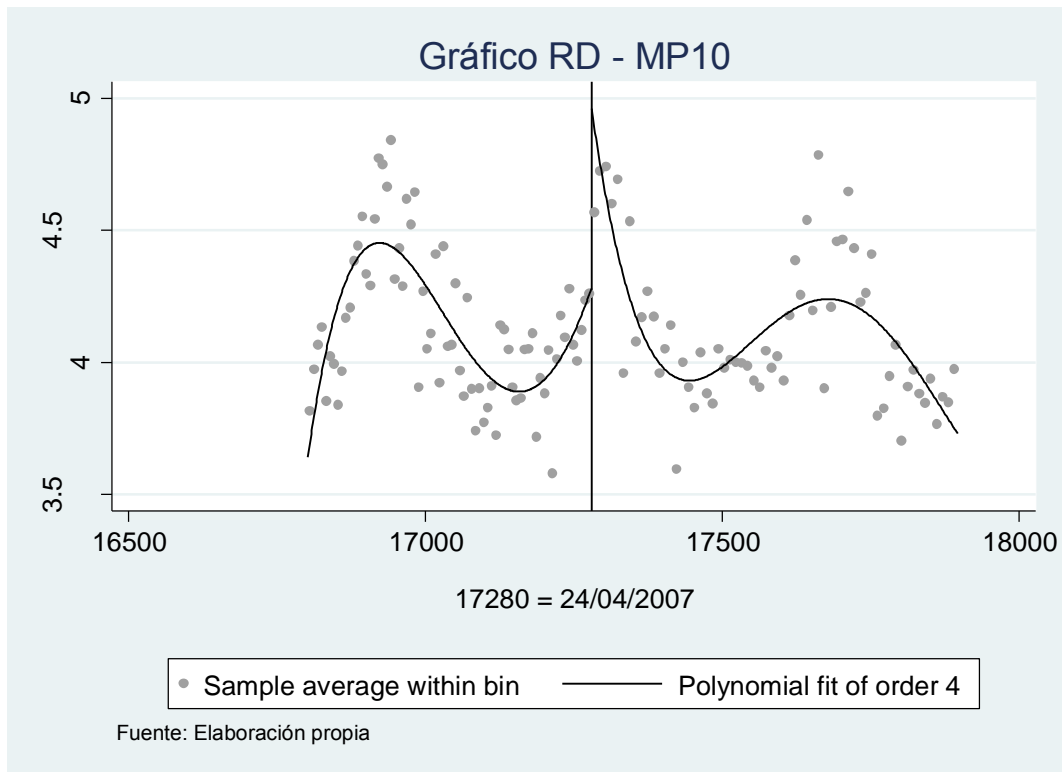
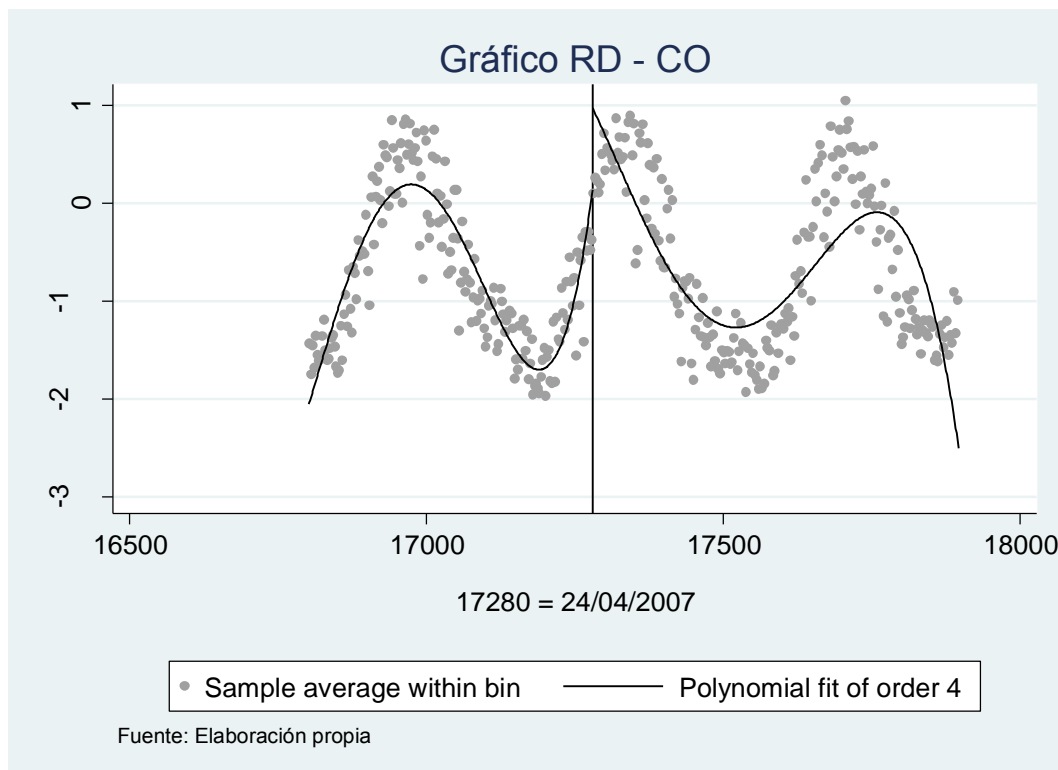


Figura 7: Continuación.



Para la versión de 2007 de la restricción vehicular, los resultados son mixtos. Para el caso del MP10 todos los coeficientes son positivos, con valores desde 0.16 para la especificación con polinomio de grado 2 hasta 0.35 para el coeficiente del polinomio de grado 1. Además, todos los coeficientes son significativos al menos al 5%. En el CO, los resultados son menos concluyentes; por un lado, las especificaciones con polinomios de grados 1 y 2 dan como resultado coeficientes negativos de -0.48 y -0.318, lo que indica que la RV en su versión 2007 redujo los niveles de CO. En cambio, las especificaciones con polinomios de grado 3 y 4, indican que se produjo un aumento de la contaminación por CO en un 25% y 28% respectivamente. Adicionalmente, las cuatro especificaciones son significativas al menos al 5%.

En general, los resultados de la regresión discontinua van en línea con lo obtenido con el OLS. Primero, refuerza el resultado de que la implementación de la restricción vehicular en su forma de 1998 contribuyó a disminuir los niveles de CO y MP10. También, los resultados de la regresión discontinua refuerzan la idea de que la actualización de la restricción en 2007 no

contribuye a reducir los niveles de MP10 en la atmósfera, sino que más bien, genera un incremento de la misma. Por último, los resultados para el CO con la actualización de la medida en 2007 debilitan la conclusión sacada a partir de la regresión MCO, ya que los resultados son mixtos y contradictorios. Para abordar este resultado, es necesario probar la robustez de los resultados.

7.4 Robustez

Para verificar la robustez de los resultados obtenidos, se realizaron especificaciones alternativas de la regresión de mínimos cuadrados y del diseño de regresión discontinua.

Para la regresión por mínimos cuadrados se realizaron 4 especificaciones alternativas, las cuales son: incorporación de un indicador de inversión térmica a las especificaciones originales, una especificación únicamente con variables meteorológicas, la incorporación del rezago de la variable dependiente a la especificación original, y una regresión con efectos fijos por estación de medición. Los resultados se muestran en la tabla 11.

Para la especificación con inversión térmica, se diseñó un indicador binario, el cual toma valor 1 si se detecta un aumento vertical de la temperatura entre una altura de 500 y 1400 sobre el nivel del mar—alturas en torno a la media de Santiago y la Cordillera de la Costa respectivamente—, y valor cero en otro caso. Bajo esta especificación, los resultados indican que la restricción en su formato de 1998 contribuye a disminuir ambos contaminantes, aunque para el PM_{10} sólo un coeficiente es significativo, mientras que, para el CO, sólo uno no es significativo. En cuanto al formato de 2007 de la medida, nuevamente los resultados sugieren que contribuye a aumentar los niveles de ambos contaminantes.

La especificación que solo incluye variables meteorológicas, no muestra evidencia de que el formato de 1998 de la restricción vehicular contribuya a mejorar los niveles de PM_{10} , pero si indican que contribuye a mejorar los niveles de CO. Por otro lado, dan cuenta de un aumento de los niveles de ambos contaminantes, tras la actualización de la medida en 2007.

La especificación que incorpora un rezago de la variable dependiente, entrega resultados mixtos respecto al impacto de la medida en su formato de 1998, sobre los niveles de CO,

obteniéndose coeficientes negativos y positivos significativos. Respecto al formato de 2007, los resultados indican que tras la actualización de la restricción vehicular aumentan los niveles de ambos contaminantes.

Por último, la especificación con efecto fijo por estación, indican que la medida implementada en 1998 contribuyó a reducir significativamente los niveles de ambos contaminantes, mientras que posterior a la actualización de 2007, se produjo un aumento de los niveles de ambos, el MP10 y el CO.

Para el caso de la regresión discontinua, se analizaron dos especificaciones alternativas —utilizando polinomios de tendencia de tiempo desde grado 2 hasta grado 5—, una incluyendo solo variables climatológicas y otras incorporando el rezago de la variable dependiente. Los resultados se muestran en la tabla 12.

Las especificaciones que incluye únicamente variables meteorológicas, indica que el primer formato de la medida contribuyó a disminuir la concentración del CO y del MP10. Por otro lado, los resultados sugieren que tras la implementación de la actualización de 2007 aumentaron los niveles de ambos contaminantes, aunque para el CO y MP10, el coeficiente de la regresión con polinomio de grado 2 es negativo, pero no significativo.

Los resultados de la especificación que incorpora un rezago de la variable dependiente no entregan evidencia de que ninguna de las versiones de la restricción vehicular contribuyese a mejorar los niveles de MP10, al no obtenerse ningún coeficiente significativo, aunque los signos van en concordancia con lo obtenido en las demás especificaciones. Para el caso del CO, los coeficientes asociados a la restricción impuesta en 1998 son negativos, denotando una mejora, aunque solo el del polinomio de grado 4 es significativo. Respecto al impacto de la actualización de la medida de 2007, los resultados son mixtos, obteniéndose dos coeficientes positivos y no significativos, y el coeficiente asociado al polinomio de grado 2 siendo el único negativo y significativo.

Considerando los resultados de la especificación principal más las alternativas, los resultados indican de forma consistente que la implementación de la restricción vehicular contribuyó a mejorar los niveles de MP10 en Santiago, pero que, tras la implementación de la actualización de la medida en 2007, los niveles de MP10 aumentaron.

Tabla 11: Especificaciones alternativas, Mínimos Cuadrados Ordinarios

		Periodo						
		1997-1999	1997-2000	1997-2001	2006-2008	2005-2009	2004-2010	
Inversión Térmica	MP10	Restricción 1998	-0.0972* (0.0552)	-0.0423 (0.0525)	-0.0295 (0.0500)			
		Restricción 2007				0.0152 (0.0625)	0.0958** (0.0472)	0.105*** (0.0380)
	CO	Restricción 1998	-0.174*** (0.0630)	-0.145*** (0.0537)	-0.0815 (0.0511)			
		Restricción 2007				0.202*** (0.0719)	0.100* (0.0575)	0.0405 (0.0468)
Sólo Variables Climáticas	MP10	Restricción 1998	-0.0693 (0.0605)	-0.00774 (0.0588)	0.00103 (0.0561)			
		Restricción 2007				0.0568 (0.0503)	0.124*** (0.0417)	0.130*** (0.0335)
	CO	Restricción 1998	-0.152** (0.0628)	-0.114** (0.0553)	-0.0617 (0.0527)			
		Restricción 2007				0.172*** (0.0567)	0.103** (0.0471)	0.0299 (0.0394)
Rezago Variable Dependiente	MP10	Restricción 1998	-0.0520 (0.0354)	-0.0228 (0.0303)	-0.0101 (0.0297)			
		Restricción 2007				0.00120 (0.0338)	0.0515* (0.0268)	0.0616*** (0.0216)
	CO	Restricción 1998	-0.112*** (0.0395)	0.0919*** (0.0329)	-0.0508 (0.0322)			
		Restricción 2007				0.0822** (0.0378)	0.0425 (0.0275)	0.0158 (0.0222)
Efecto Fijos	MP10	Restricción 1998	-0.0787*** (0.0255)	-0.0322 (0.0238)	-0.0152 (0.0229)			
		Restricción 2007				0.0442 (0.0268)	0.122*** (0.0201)	0.132*** (0.0166)
	CO	Restricción 1998	-0.158*** (0.0442)	-0.130*** (0.0397)	0.0638* (0.0378)			
		Restricción				0.204***	0.0995***	0.0359

2007

(0.0396)

(0.0301)

(0.0257)

Resultados son robusto contra heteroscedasticidad y autocorrelación dentro de un cluster de 1 semana. Errores estándar en paréntesis: *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Para el caso del CO los resultados son menos contundentes. En general, los resultados indican que la implementación de la restricción vehicular en su formato de 1998 contribuyó a disminuir los niveles de CO, pero los resultados referentes a la efectividad del formato de 2007 son más heterogéneos. Las estimaciones MCO indican sistemáticamente que la implementación del formato actualizado de la restricción en 2007 no contribuyó a mejorar los niveles de CO en Santiago. Sin embargo, en la regresión discontinua se produce una divergencia entre los resultados obtenidos con polinomios de tendencia de tiempo de bajo grado—1 y 2—y los de mayor grado—3, 4 —; Mientras los polinomios de grado 1 y 2 tienden a indicar que la actualización de la restricción vehicular tuvo un efecto positivo sobre los niveles de CO, los polinomios de grado 3 y 4, indican que la actualización de la medida no generó una mejora, o bien se asocia a un empeoramiento de la contaminación por CO.

Por otro lado, para realizar las estimaciones del diseño de regresión discontinua (RD) se utilizó el paquete estadístico “rdrobust” para el software STATA, cuyo algoritmo se basa en Calonico, Cattaneo y Titiunik (2014)²³. Usando un criterio de minimización del error cuadrático medio para elegir el ancho de banda óptimo sobre el cual realizar la estimación RD, para los polinomios de menor grado, el algoritmo definió anchos de banda de entre 700 y 950 observaciones—cada observación corresponde un día—a cada lado del punto de corte, lo cual implica que la RD se estimó sobre ventanas de entre 4 y 6 años. En general, no es recomendable utilizar polinomios de bajo grado, particularmente de grado 1, para realizar estimaciones de RD sobre un ancho de banda amplio (Imbens, Guido y Kalyanaraman, 2009), ya que el sesgo aumenta conforme se aumenta la ventana. Este problema se agrava cuando la función de respuesta posee una gran curvatura, el cual es el caso del CO.

Para evaluar la estabilidad de los polinomios, se evaluaron las especificaciones con polinomios de grados 1 al 4 bajo sobre anchos de bandas de 200 observaciones hasta 900—estos resultados no se explicitan en el presente documento—. Los resultados obtenidos indican que las especificaciones con polinomios de grado 1 y 2 son altamente sensibles al ancho de banda seleccionado, pasando de coeficientes negativos y significativos para anchos de banda amplios, a

²³ La versión del paquete utilizada corresponde a la versión actualizada en base a Calonico, Cattaneo, Farrell y Titiunik (2017)

coeficientes positivos y significativos para bandas estrecha. Por otro lado, las especificaciones de grado 3 o superior son más estable al cambio del ancho de banda, donde se observan principalmente cambios en la significancia y magnitud de los coeficientes, pero no en su signo.

Tablas 12: Especificaciones alternativas. Diseño de Regresión Discontinua

			Polinomio de tendencia de tiempo			
			2 th	3 th	4 th	5 th
Sólo Variables Climáticas	MP10	Restricción 1998	-0.144**	-0.177**	-0.198**	-0.224**
			(0.0698)	(0.0789)	(0.0894)	(0.113)
	CO	Restricción 2007	-0.0722	0.0919	0.221**	
			(0.133)	(0.107)	(0.0920)	
Rezago Variable Dependiente	MP10	Restricción 1998	-0.0888	-0.197**	-0.227**	-0.174
			(0.0773)	(0.0876)	(0.0948)	(0.124)
	CO	Restricción 2007	-0.0859	0.247**	0.263***	
			(0.131)	(0.102)	(0.0929)	
Rezago Variable Dependiente	MP10	Restricción 1998	-0.0227	-0.0357	-0.0549	-0.0552
			(0.0475)	(0.0529)	(0.0589)	(0.0683)
	CO	Restricción 2007	-0.0912	0.0297	0.0450	
			(0.0609)	(0.0493)	(0.0520)	
Rezago Variable Dependiente	MP10	Restricción 1998	-0.0465	-0.107	-0.124*	-0.0796
			(0.0553)	(0.0653)	(0.0658)	(0.0905)
	CO	Restricción 2007	-0.170**	0.0407	0.0674	
			(0.0778)	(0.0584)	(0.0633)	

Resultados son robusto contra heteroscedasticidad y autocorrelación dentro de un cluster de 1 semana.
Errores estándar en paréntesis: *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

La alta sensibilidad de las especificaciones con polinomios de grado 1 y 2 al ancho de banda seleccionado, lo podemos explicar por el patrón ya mencionado de la evolución del CO, donde bandas cortas solo capturan el aumento de los niveles observados entre los años 2007 y 2009, pero al ampliar el ancho de banda, se captura el minio alcanzado en 2010, lo cual afecta notoriamente la pendiente de ajuste de las curvas definidas por estos polinomios.

7.5 Explicaciones a los resultados

En esta sección se analizan posibles explicaciones a la pérdida de efectividad de la medida con el paso del tiempo, o más aún, su impacto nulo o incluso su contribución a aumentar la contaminación en Santiago, como sugieren los resultados obtenidos para la actualización de la medida del año 2007.

El análisis se centra en los fenómenos adaptativos que la literatura y la evidencia empírica recurrentemente proponen como los causantes del fracaso de la restricción vehicular alrededor del mundo, los cuales son la adquisición de un segundo automóvil, el uso de transportes alternativos que contribuyan a los niveles de contaminación, el aumento del parque automotriz y el cambio en su composición, entre otros.

7.5.1 Aumento del parque automotriz.

El aumento del parque automotriz neutraliza la efectividad de la restricción vehicular, al compensar la cantidad de vehículos que la medida retira de circulación, manteniendo constante o aumentando el tráfico respecto al escenario base de comparación.

Según datos del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), entre los años 2001 y 2010, los vehículos en la Región Metropolitana pasaron de ser 915.507 a ser 1.385.466, lo cual implica que en poco menos de una década, el parque automotriz de la Región Metropolitana creció en un 51,3%, a una media anual de un 5,7%, lo cual supone un aumento notable. Considerando que de Grange y Troncoso (2011) estimaron que en la práctica la restricción vehicular disminuye el tráfico promedio solo en un 5,5%, el crecimiento anual del parque automotriz compensa completamente a la medida, respecto a un escenario base de un año anterior sin restricción vehicular.

Otro aspecto importante a considerar dentro del crecimiento del parque automotriz es la renovación tecnológica. Los datos del INE indican que, en 2001, los vehículos sin convertidor catalítico representaban el 39,2% del parque automotriz de la Región Metropolitana, cifra que baja hasta un 6,3% en 2010, notándose un notable descenso durante el año 2007. De esta forma, aunque el aumento del parque automotriz compensa año a año el efecto de la restricción

vehicular—respecto al año anterior—, los vehículos que se incorporan al flujo vehicular son menos contaminantes que los que retira de circulación la restricción vehicular, por lo cual el efecto neto debería ir en la dirección de una reducción de la contaminación. Sin embargo, hay que notar, que, actualmente el porcentaje de parque automotriz de la capital que no equipa convertidor catalítico es muy bajo, lo cual disminuye drásticamente el efecto que tiene la renovación del parque automotriz sobre la polución—revisar anexo 3—.

7.5.2 Cambio en la composición del parque automotriz

Los cambios en la composición del parque automotriz en términos del combustible que utilizan los vehículos pueden afectar las emisiones globales del parque automotriz. Así, un aumento de la proporción de vehículos diesel está asociada a un aumento total de MP₁₀, MP_{2.5}, NO, NO_x y NO, mientras que un aumento de la proporción de vehículos a gasolina está asociada a un aumento del CO, CO₂ Y HC.

De acuerdo a datos del INE, en 2001, los vehículos a gasolina correspondían a un 87,1 % y los vehículos a diesel a un 8,73% del total de vehículos de la región. En 2010, los vehículos a gasolina pasan a representar un 84,4 % del parque automotriz, y los vehículos a diesel un 15,5%, lo cual implica que los vehículos diesel ganaron una participación de un 6,8%, a una media anual del, 0,85%—revisar anexo 4—.

Otro cambio importante a tener en consideración es el cambio de la composición del parque automotriz según el tipo de vehículo, es decir, la proporción del parque automotriz que corresponde a automóviles—berlinas, station wagon, hatchback, etc—, SUV's—incluyendo vehículos todoterreno—, camionetas y furgones.

Según datos de la ANAC, en el año 2005, las ventas de vehículos de pasajeros correspondían a un 61%, de SUV's a un 11% y de camionetas a un 16%. Por otro lado, en 2015 las ventas de vehículos de pasajeros pasaron a representar un 49%, las de SUV's un 26% y las de camionetas se mantuvieron en un 16%, lo cual implica que mientras los vehículos perdieron una participación de mercado de un 14%, los SUV's ganaron una participación de mercado de un 15%—revisar anexo 5—.

Este cambio en el mercado de vehículos da cuenta de que el parque automotriz se va renovando año a año por vehículos de mejor tecnología, pero de mayor tamaño y por lo tanto, con

menor rendimiento y mayores emisiones—respecto a automóviles con similar nivel tecnológico—, lo cual disminuye el impacto de la renovación tecnológica sobre las emisiones globales de contaminantes. También es importante considerar que el uso de vehículos de mayor tamaño en el radio urbano contribuye la congestión vehicular, lo cual a su vez empeora el problema de la contaminación del aire.

Si bien las estadísticas dan cuenta de un cambio en la composición del parque automotriz que contribuye a un aumento de la contaminación, sólo con esta información no se puede hacer ninguna afirmación concluyente al respecto. Primero, respecto a los vehículos diesel, su aumento no es especialmente de gran magnitud, lo cual hace necesario estudiar en detalle las emisiones de estos respecto a vehículos equivalentes a gasolina. Y segundo, respecto al aumento de las ventas de vehículos SUV's, es necesario analizar en detalle su participación dentro del parque automotriz, así como las características de su uso—por ejemplo, puede que su adquisición sea principalmente como segundo vehículo para vacacionar y no como vehículo principal de uso diario—.

7.5.3 Uso de medios de transportes alternativos

Ante la imposibilidad de utilizar el vehículo, es esperable que quienes se vean afectados por la restricción utilicen un transporte alternativo. Puede darse el caso que este cambio en la modalidad de transporte genera mayor contaminación que los vehículos que se dejan de utilizar para moverse.

Para analizar esta posibilidad, se recurre a las Encuesta de Origen y Destino de Viajes de Santiago, la cual ofrece una comparación de partición modal de los viajes hechos en el Gran Santiago durante un día laboral normal, entre el año 2001 y 2012. Entre ambos años, los viajes en automóvil pasaron de representar un 21% a un 26,1%, mientras que la categoría Bip!—buses más el metro— pasaron de representar un 30,1% a un 23,7%, dando cuenta de que se ha producido un cambio modal desde el transporte público hacia el automóvil, el cual ocurre en el sentido contrario al que se espera que produzca la restricción vehicular—revisar anexo 6—. Esto genera que cada individuo que emigra desde sistema de transporte público hacia el vehículo

privado aumenta su nivel de emisiones, contribuyendo al aumento global de los niveles de contaminación.

7.5.4 Adquisición de un segundo vehículo

Para analizar la evolución de la población que posee más de un vehículo, se analizan los datos de las encuestas CASEN de los años 1998, 2006, 2011 y 2015, en donde se identifica el número de hogares que poseen vehículo, diferenciando aquellos que poseen sólo uno, de aquellos que poseen dos o más vehículos—ver anexo 7—. Entre los años 1998 y 2006 los hogares en posesión de más de un vehículo aumentaron en un 10,4%—de 78.523 a 86.674 hogares—, tasa que aumentó a un 19,5%—de 86.674 a 103.542 hogares—entre los años 2006 y 2011, y finalmente entre los años 2011 y 2015 se observa un crecimiento un 19,1%, dando un aumento global de un 57,1% de los hogares con al menos 2 vehículos. Por otro lado, los hogares en posesión de un vehículo aumentaron en un 118,5% entre los años 1998 y 2015—de 322.820 a 705.210 hogares—.

Los datos dan cuenta de un gran aumento de los hogares en posesión de dos o más vehículos con un crecimiento anual promedio de 3,4%, aunque palidecen frente al crecimiento anual promedio de un 6,97% de los hogares en posesión de un vehículo, indicando que el gran aumento del parque automotriz en Santiago se debe en mayor medida al aumento de hogares que adquieren su primer vehículo, aunque el crecimiento de los hogares que adquieren vehículos adicionales es alto.

Aunque sólo con esta información no se puede establecer una causalidad entre la adquisición de un segundo vehículo por parte de los hogares y la restricción vehicular, el gran aumento de los hogares en posesión de más de un vehículo merma de forma importante la efectividad de la restricción vehicular, agravando el impacto negativo que de por sí tiene el gran aumento del parque automotriz en Santiago.

8. Medidas para controlar las emisiones del transporte

8.1 Medidas tradicionales

A fin de reducir los niveles de polución del aire en zonas urbanas, se han diseñado e implementado diversas medidas, la cuales son ampliamente diversas en sus mecanismos y foco de acción. A continuación, se mencionan las medidas más utilizadas transversalmente alrededor del globo.

Contenido de sulfuros. La reducción del contenido de sulfuros de los combustibles aporta a reducir la polución mediante dos vías; primero, el sulfuro en sí mismo es un contaminante, y segundo, la reducción del contenido de sulfuro del combustible permite el uso en vehículos de tecnologías de control de la polución más sofisticadas y eficientes, tales como, convertidores catalíticos, trampas de NO_x o filtros de partículas diesel. Por ejemplo, el uso de combustibles libre de sulfuros permite utilizar trampas de NO_x, lo cual permitiría incrementar el control de emisiones de NO_x en torno a un 90%, tanto en motores diesel como a gasolina (Branco, Blumberg, and Walsh, 2004)

Control de las emisiones de vehículos a gasolina y diesel. El control de las emisiones de vehículos se realiza mediante la mejora tecnológica de los motores de combustión o con implementación y mejora de tecnologías de procesamiento postcombustión de las partículas contaminantes. Ejemplos de estas tecnologías son: el convertidor catalítico, el sistema de escape con recirculación de gases y trampa de partículas o el filtro de partículas en motores diesel. Así, por ejemplo, la implementación del convertidor catalítico de 3 vías durante la década 1990 estaría asociada a una reducción del 5 % de las emisiones de CO₂—comparación entre vehículos con

normativa euro I y euro II—, el EGR reduce las emisiones de NO_x en un 45%—reduciendo las emisiones de PM, pero aumentando las de CO₂ en un 2%—, y los DPF permiten reducir las emisiones de PM, aunque su efecto varía notablemente en función de la tecnología utilizada (Air Quality Expert Group, 2007).

Incentivos a vehículos híbridos. Los vehículos híbridos combinan un motor de combustión interna —diesel o gasolina —con un sistema de propulsión eléctrico. En general el sistema híbrido cumple una función de asistencia, aunque también puede permitir circular en modo puramente eléctrico a bajas velocidades, como por ejemplo en el tráfico urbano. En un ciclo de conducción cambiando, los vehículos híbridos producen un 40% menos de CO₂, un 57% menos de NO_x y un 66% menos de CO que uno a gasolina, mientras y un 17% menos de CO₂ y un 90% menos de NO_x que uno diesel—vehículos con normativa euro IV—(Air Quality Expert Group, 2007).

Cargo por congestión. Su objetivo es reducir la congestión vial, reduciendo la demanda mediante un cobro a los vehículos que circulan en un área definida. La reducción del tráfico disminuye las emisiones de contaminantes, aunque su efectividad varía sustancialmente en función del esquema implementado. Aunque esta medida ha sido ampliamente implementada en las naciones desarrolladas, en los países en desarrollo es altamente impopular. Esto se debe a que el pago de la tarifa es vista como regresiva, como un impuesto recaudatorio o porque existe el temor de que afecte a la economía. Si bien son preocupaciones racionales, no existe evidencia que apoye su veracidad, sino más bien lo contrario. Así, el aumento de la demanda por transporte público genera nuevos empleos e incentiva la innovación, y una política de reinversión de lo recaudado, permite mejorar la red de transporte e implementar otras políticas que compense a posibles perjudicados. (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, 2015). Un ejemplo clásico es Londres; el cargo por congestión – que cubre menos del 2% de la superficie urbana—ha contribuido a reducir los niveles de NO_x y PM en un 12% y en un 20% las de CO₂.

Zonas de bajas emisiones (LEZ). Las LEZ reducen las emisiones del transporte por carretera sobre un área geográfica específica, restringiendo el acceso de ciertos tipos de vehículos a dicha área – en base a diferentes criterios, como el nivel tecnológico, antigüedad, etc—. El foco de la medida está en reducir la polución de efecto local y no en GEI, aunque impacta sobre los niveles de ambos. Los ejemplos más representativos de esta medida son Berlín, Estocolmo,

Ámsterdam y Londres. En Berlín, las emisiones directas de PM y NO_x disminuyeron en un 50% y 20% respectivamente, respecto a las tendencias de emisiones proyectadas en ausencia de la medida (German Partnership for Sustainable Mobility, 2015a). En Ámsterdam, la LEZ contribuyó a reducir las concentraciones de NO₂ en un 4,9%, de PM₁₀ en un 5,8% y de Carbono Elemental en un 12,9% (Panteliadis et. al., 2014). Según Holman et. al. (2015), tras estudiar a 5 países de la UE, concluye que las LEZ contribuyen a la reducción de PM y Carbono Elemental en el largo plazo.

Estándar de emisiones del sistema de escape. El estándar de emisiones requiere que los vehículos cumplan con una normativa de emisiones al momento de incorporarse al parque automotriz. Los estándares que son los referentes internacionalmente aceptados son: la normativa Europea, de Estados Unidos y la Japonesa. Los demás países adoptan directamente estos estándares y crean los propios basándose en ellos, según sus necesidades y posibilidades.

Cargo por emisiones. Los cargos por emisiones generan un incentivo a comprar vehículos menos contaminantes, al incrementar el costo de adquisición y/o de operación de vehículos con altas emisiones. Normalmente se implementan dos esquemas, el cobro de un diferencial en la tarifa de adquisición del vehículo y/o el pago de una diferencial anual en la tarifa de registro del vehículo. Un esquema bien diseñado, establece un nivel de la tarifa que refleje el costo generado por las emisiones de cada tipo de vehículo. Esta medida es adecuada para controlar las emisiones de CO₂, no así para abordar los contaminantes locales (NZ).

8.2 Nuevas tendencias

En años recientes ha habido un cambio de paradigma respecto a cómo se entiende la movilidad urbana, y las cualidades deseables que debe poseer. Este cambio en la concepción de la movilidad urbana ha generado la proliferación de nuevas medidas destinadas a solucionar las necesidades de transporte de las urbes, y a continuación se mencionan algunas destacadas.

Estaciones multimodal. La integración de los medios de transporte o intermovilidad, permite crear un sistema de transporte integrado en el cual personas y mercancías se movilizan eficientemente, gracias a un mayor efectividad, flexibilidad, sustentabilidad y menores costos. La integración modal permite combinar las mejores cualidades de los diferentes modos de transporte disponibles en diferentes sectores de la ciudad, permitiendo elegir el mix óptimo de modos de

transporte para alcanzar el destino (State of Green, 2016). Una forma efectiva de lograr la intermodalidad, es a través de la implementación de estaciones multimodales. Una estación multimodal es un espacio con la infraestructura adecuada—estación de metro/tren, parada de autobús, estacionamiento para vehículos y bicicletas, etc.—, en la que confluyen múltiples modos de transporte, permitiendo elegir el medio óptimo para continuar el viaje (GPSM, 2015b). Un aspecto central del concepto es que no se limita a la tradicional combinación de parada de buses y de estación de metro/tren. Este concepto nació en Europa, y su implementación se ha extendido fuertemente en el viejo continente, aunque también de está implementado en Japón y Corea del Sur, por mencionar algunos.

Autobuses de cero o bajas emisiones. Los autobuses son el principal medio de transporte público alrededor del mundo, y son un importante contribuyente a la polución del aire. Dada su importancia e impacto sobre la calidad del aire, su mejora tecnológica es indispensable, lo que ha generado el desarrollo de buses que utilizan variadas tecnologías y fuentes de energía de cero o bajas emisiones, como lo son los buses eléctricos, de pila de hidrógeno o híbridos. La viabilidad de la implementación de estas nuevas tecnologías depende en gran medida del costo y eficiencia del desarrollo de la infraestructura necesaria para su funcionamiento. Así, por ejemplo, se han desarrollado estaciones con supercargadores o sistemas de carga inalámbrica par los buses eléctricos (GPSM, 2015a; GPSM, 2015b).

Uso compartido del automóvil. El automóvil es uno de los principales medios de transporte, pero su tasa de ocupación es muy baja, ya que la mayoría de los conductores viaja sin acompañante. Esto le da al automóvil un gran margen de mejora en su eficiencia, ya que se puede mantener la participación modal del automóvil disminuyendo la cantidad de vehículos en circulación. Para lograr este fin, se han desarrollados múltiples modalidades de uso compartido del automóvil, siendo las principales, el “carsharing” y el “carpooling” o “ridesharing”. El “carsharing”, es un modelo de uso temporal de vehículos en zonas urbanas, en el cual múltiples usuarios comparten el uso de una flota de vehículos, pagando por tiempo de uso. Es una modalidad de rápido crecimiento, sobre todo en Europa—donde Alemania posee el mercado más desarrollado a nivel mundial—, en donde ofrecen la ventaja de poder aparcar el vehículo en cualquier estacionamiento público, lo cual otorga gran flexibilidad, mejorando la eficiencia del servicio y maximizando el número de personas que utilizan un mismo vehículo. En países

emergentes lentamente está comenzando a expandirse el concepto, aunque su modalidad tiende a ser más rígida (Lane, Zeng, Dhingra & Carrigan, 2015). El “ridesharing” es el uso compartido del vehículo para realizar viajes, de modo que varias personas que comparten origen y destino cercanos utilizan un mismo vehículo. El éxito de estas modalidades está fuertemente determinado por el desarrollo de plataformas tecnológicas que permitan una comunicación eficiente y confiable entre los usuarios y prestatarios del servicio (GPSM, 2015b).

Bicicletas. EL uso de la bicicleta como medio de transporte está siendo promovido fuertemente a nivel internacional, donde destacan los casos de los Países Bajos y Dinamarca. La expansión del uso de la bicicleta y la integración modal se ha visto favorecida gracias al desarrollo del “bikesharing”, el cual permite arrendar una bicicleta por un periodo de tiempo según se precise (State of Green, 2016; Malmö Stad, 2016). El siguiente paso, es el uso de las bicicletas para el transporte de cargas en el ambiente urbano. Gran parte de las cargas que se transportan en el radio urbano son de bajo peso y de poco tamaño, por lo que, con la infraestructura y bicicletas adecuadas, un gran porcentaje de las cargas podrían ser transportadas de forma eficiente y segura en bicicletas (GPSM, 2015b), concepto que ya se está llevando a cabo en lugares como Alemania o Dinamarca.

Densidad urbana. La compactación urbana busca incrementar la densidad de áreas construidas y de la población, a fin de intensificar la actividad económica urbana, las actividades sociales culturales, y manipular el diseño y tamaño de las zonas urbanas, lo cual genera beneficios medioambientales, sociales y de sustentabilidad global (United Nations Human Settlements Programme, 2012). Un diseño más compacto, permite reducir las distancias y tener una red urbana mejor integrada, reduciendo los tiempos de viaje y la necesidad de utilizar medios de transportes motorizados, facilitando el desarrollo de un sistema de movilidad urbano sustentable. Adicionalmente, la reducción de las necesidades de transporte permite recuperar superficie urbana y redestinarla como áreas verdes, zonas de ocio o de comercio, entre otros, mejorando la calidad de vida y fomentando la actividad económica (UN-Habitat, 2012; Malmö Stad, 2016).

9. Enfoque estratégico

La contaminación del aire en zonas urbanas producida por la circulación de vehículos es un problema en el que se conjugan múltiples actores y factores. El automóvil es un miembro más dentro del sistema de transporte de un espacio urbano, en el cual, sus múltiples componentes interactúan y se influyen mutuamente. El diseño, utilización y desarrollo del sistema de transporte, está condicionado, entre otros factores, por: las actividades económicas, por las características geográficas, por el diseño urbano, por la tecnología disponible y por los patrones de movimientos de los ciudadanos; los cuales, a su vez, están determinados por factores sociales, culturales y psicológicos o conductuales. La conjugación de todos estos elementos, definen los patrones e intensidad de uso de los diferentes componentes de la red de transporte urbano, lo cual determina la magnitud de las emisiones de contaminantes de los diferentes medios de transporte. La magnitud de las emisiones sumado a los factores climáticos, son los que finalmente determinan los niveles de concentración de polución del aire y, por tanto, del impacto de la contaminación sobre el bienestar de la población y el medioambiente.

La complejidad del proceso que determina el nivel de polución del aire y de su impacto, hace que la implementación de medidas aisladas, de medidas múltiples no coordinadas o de medidas no estudiadas en la profundidad necesaria, no sean efectivas o incluso sean contraproducentes. El solucionar el problema de la polución del aire requiere abordar a los diferentes factores de forma integral, a través de medidas estratégicamente diseñadas a fin de generar sinergias, evitando así, que estas puedan obstruirse entre sí.

9.1. Avoid – Shift – Improve

Las altas emisiones proveniente de los vehículos, y del sector transporte en general, es causado principalmente por la preferencia por usar el automóvil personal como el principal medio de transporte dentro de las ciudades. Por lo tanto, para abordar este fenómeno, es necesario minimizar la necesidad por utilizar el automóvil privado.

El enfoque ASI (Avoid-Shift-Improve) es ampliamente utilizado para abordar el manejo de la demanda por transporte en las ciudades modernas, y así solucionar sus externalidades, haciendo que el transporte sea sustentable (Agarwal, 2014; EEA, 2016b; GIZ, n.f)). El enfoque

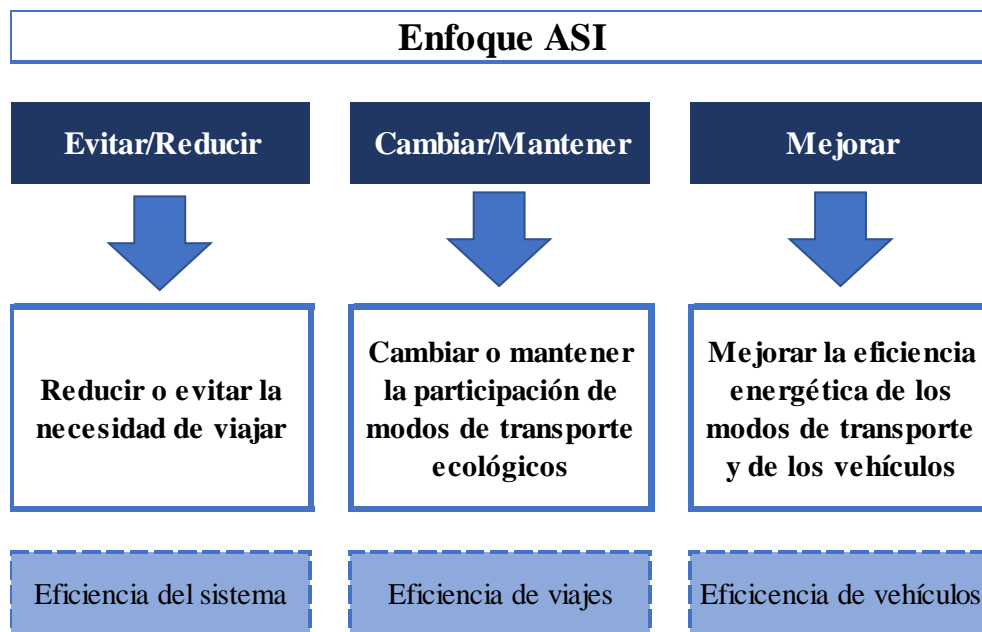
ASI vincula tres instrumentos de acciones principales: Evitar/Reducir (Avoid/Reduce), Cambiar/Mantener (Shift/Maintain) y Mejorar (Improve).

Los instrumentos de la categoría Evitar, buscan mejorar la eficiencia del sistema de transporte en su conjunto, disminuyendo la demanda por transporte –número de viajes por individuo, multiplicado por la duración de cada viaje–. Así, a través de una planificación integrada del uso del suelo en conjunto con un manejo de la demanda por transporte, se puede reducir la necesidad por viajar y la duración de cada viaje, lo cual contribuye a reducir la contaminación (Agarwal, 2014; GIZ, n.f.).

Los instrumentos de la categoría Cambiar, buscan mejorar la eficiencia del viaje. Esto se logra a través de un cambio modal desde un modo de transporte intensivo en el uso de energía y emisiones, hacia otro más amigable en términos medioambientales. En particular, se busca persuadir a la población para que cambie el uso del vehículo personal por el transporte público o por modos de transporte no motorizados—como caminar o la bicicleta—(Agarwal, 2014; GIZ, n.f.).

Los instrumentos de la categoría Mejorar, buscan mejorar la eficiencia del vehículo y del combustible, así como optimizar la infraestructura de transporte, con el fin de minimizar el impacto negativo del transporte público y de los vehículos privados cuando su uso es inevitable. Esto se logra a través del avance tecnológico en el transporte y de los automóviles, particularmente en tecnologías referidas a la eficiencia energética y a las emisiones de contaminantes (Agarwal, 2014; GIZ, n.f.).

Figura 8: Esquema del enfoque Avoid-Shift-Improve.



Fuente: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (n.f.)

La implementación de un set de medidas integradas y bien diseñadas, que actúen a través de las tres vías del enfoque ASI, permitirían avanzar hacia un modelo de transporte sustentable, generando no sólo beneficios en la mejora de la calidad del aire; sino también, en la reducción de externalidades del transporte en general, en el mejoramiento de la calidad de vida o fomentando el desarrollo económico.

9.1.2. Rutas hacia la movilidad sostenible

A partir del enfoque ASI, se identifican 3 potenciales sendas a través de las cuales se puede alcanzar la transición hacia un sistema de movilidad sostenible. Se establece una vía base, la cual representa el modelo de movilidad convencional — “los negocios como de costumbre”—. En esta vía, se asume que el crecimiento económico (Y) implícitamente conlleva un aumento de la actividad del sector transporte (T) —en todas sus modalidades—, el cual, a su vez, genera un aumento de las emisiones (E) equivalente. Esta situación se representa mediante tres esferas—Y, T y E—acopladas y correlacionadas. Respecto a esta situación base, las vías de Evitar, Cambiar

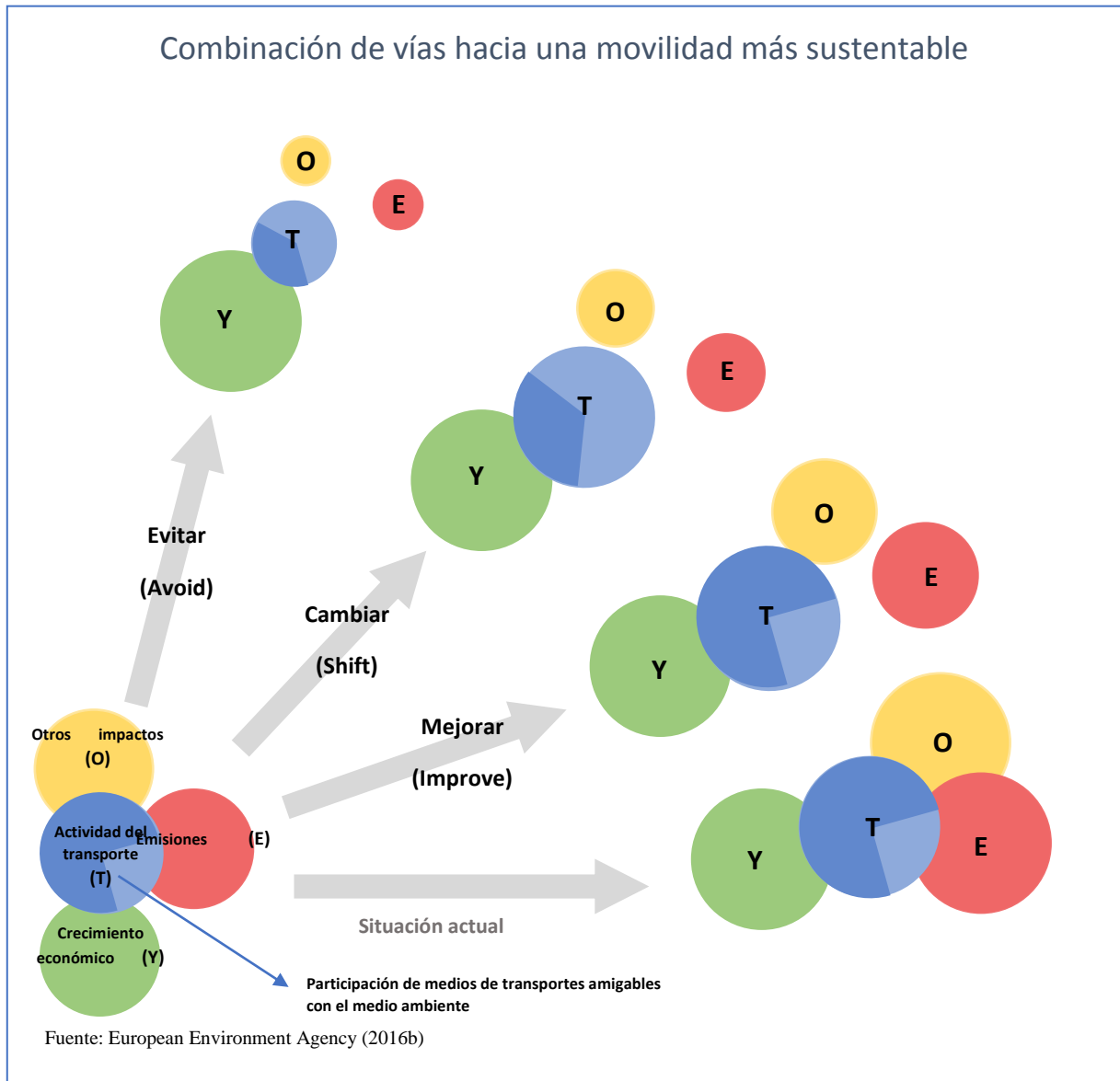
y Mejorar, ofrecen un gran potencial de una mejora medioambiental, sin disminuir la actividad económica (Hammadou & Papaix, 2014; EEA, 2016b).

La vía Mejorar, produce un desacoplamiento entre la actividad del transporte (T) y sus emisiones (E). Bajo este escenario, un aumento de la actividad económica (Y) induce un aumento de la actividad del transporte (T). Sin embargo, gracias a la mejora tecnológica—de los vehículos, combustible o de la infraestructura vial—, el aumento del transporte (T) no se traduce en un aumento equivalente de sus emisiones (E) (Hammadou & Papaix, 2014; EEA, 2016b).

La vía Cambiar, también produce un desacoplamiento entre el transporte (T) y sus emisiones (E), reduciendo significativamente las emisiones. El desacoplamiento se produce por un cambio modal de los individuos, hacia medios de transporte no motorizados o de cero emisiones—caminar, bicicletas o autos eléctricos, por ejemplo—. La actividad económica (Y) y la actividad del transporte (T) siguen estando acopladas (Hammadou & Papaix, 2014; EEA, 2016b).

Por último, en **la vía Evitar**, se produce un desacoplamiento entre el transporte (T) y las emisiones (E), pero además el aumento de la actividad económica (Y) va acompañado de una reducción de la actividad del transporte (T). Este escenario se construye a partir de la vía Cambiar, a la que se incorpora un mayor uso de la capacidad de la red de transporte, una reducción de los viajes y de la distancia recorrida en cada uno de ellos. Esto se produce por mejoras tecnológicas del sistema de transporte, por profundos cambios conductuales de los individuos y por la implementación de políticas que rediseñan la movilidad urbana, entre otros, lo cual la convierte en la vía más difícil de adoptar (Hammadou & Papaix, 2014; EEA, 2016b).

Figura 9: Vías hacia una movilidad sustentable.



9.2. Plan de Movilidad Urbana Sustentable

En 1992, la Comisión Europea lanzó el concepto de “transporte sostenible”, el cual originalmente se asociaba específicamente a los problemas ambientales producidos por el transporte. Desde entonces, el transporte sustentable se ha convertido en una misión global, y su concepción ha evolucionado hasta su forma actual, la que se caracteriza por tener un enfoque multidisciplinario, abarcando el balance presente y futuro medioambiental, social y económico.

Con el fin de avanzar hacia la implementación plena de un esquema de transporte sustentable, la Comisión Europea desarrolla el concepto de Plan de Movilidad Urbana Sustentable (SUMP por sus siglas en inglés), y lo integra como parte del Urban Mobility Package (Paquete de Movilidad Urbana) lanzado en 2013, para intensificar su distribución e implementación. *“Un Plan de Movilidad Urbana Sustentable, es un plan estratégico diseñado para satisfacer las necesidades de movilidad de las personas y empresas, en las ciudades y sus alrededores, en post de una mejor calidad de vida. Se basa en las prácticas de planificación existentes y tiene en cuenta los principios de integración, participación y evaluación”* (Wefering, F., Rupprecht, S., Bührmann, S. & Böhler-Baedeker, S., 2014))

El propósito de un SUMP es crear un sistema de transporte urbano sostenible, a través del aseguramiento del acceso a trabajos y servicios a todos los miembros de la comunidad, el mejoramiento la seguridad, la reducción de la polución, los GEI y el consumo energético, el incremento de la eficiencia y rentabilidad del transporte de bienes y personas, y la contribución al atractivo y calidad del ambiente urbano (Wefering, F., Rupprecht, S., Bührmann, S. & Böhler-Baedeker, S., 2014).

Una diferencia clave entre un el SUMP y los enfoques convencionales de planificación del transporte urbano, es que el concepto SUMP le da particular importancia a la participación de la ciudadanía y de los grupos de interés en el proceso, a la coordinación de política entre sectores —transporte, medioambiente, desarrollo económico, salud, seguridad, etc.—y entre los diferentes niveles de la autoridad (Wefering, F., Rupprecht, S., Bührmann, S. & Böhler-Baedeker, S., 2014).

Un SUMP bien diseñado debe abordar de forma exhaustiva a todas las modalidades de transporte en la aglomeración urbana, y no enfocarse solo en promover el transporte público o las modalidades de transporte no motorizadas, para así llegar a la solución de movilidad urbana óptima, con una perspectiva integrada de todas las modalidades de transporte (Böhler-Baedeker, S., Kost, C. & Merforth, M.,2014))

La forma estratégica en que un SUMP aborda el problema de la movilidad urbana se construye a partir de un proceso de planificación estructurado, el cual abarca el análisis de estatus, la construcción de una visión, el establecimiento de objetivo y metas, la selección de medidas y políticas, una comunicación activa, y un proceso de monitoreo y evaluación. Las

características básicas de un SUMP son la visión de largo plazo, el involucramiento, el desarrollo balanceado, la cooperación y la evaluación. La tabla 13 describe el proceso de desarrollo de un SUMP.

Tabla 13: Pasos de planificación de un Plan de Movilidad Sustentable.

Pasos de planificación		Acciones tomadas/organizadas por la administración de la ciudad
Preparación	Paso 1	Proveer un marco general para el proceso de planificación y de implementación del plan.
	Paso 2	Definir el alcance del plan, el plan de trabajo y acuerdos de gestión.
	Paso 3	Analizar la situación actual de movilidad y realizar un análisis de futuros escenarios de situaciones de movilidad.
Establecimiento de metas	Paso 4	Desarrollar una visión común de movilidad.
	Paso 5	Especificar objetivos, los cuales indican el tipo de cambio deseado; seleccionar un set de metas bien pensados con foco en las áreas seleccionadas.
	Paso 6	identificar y seleccionar las medidas, que pueden satisfacer los objetivos.
Elaboración	Paso 7	Determinar responsabilidades claras; elaborar el presupuesto y la implementación del plan.
	Paso 8	Desarrollar herramientas de seguimiento y evaluación del proceso.
	Paso 9	Asegurar la aceptación del plan por el público y preparar la adopción del plan por parte de los representantes políticos.
Implementación	Paso 10	Definir un enfoque estructurado para afinar los objetivos y planificar, detallar, administrar, comunicar y monitorear la implementación de las medidas.
	Paso 11	Verificar el progreso y realizar una retroalimentación con los resultados.

Fuente: Rupprecht Consult (2014), citado en Böhler-Baedeker, S., Kost, C. & Merforth, M (2014)

10. ¿Qué se está haciendo en Santiago?

Ante la necesidad de atacar el problema de la polución del aire de forma efectiva, actualmente la autoridad está actualizando el Plan de Prevención y Descontaminación Ambiental

para la Región Metropolitana (PPDA RM), cuyas medias se aplicarán a partir de 2018—para fuentes móviles—. Para abordar las emisiones provenientes de fuentes móviles, el PPDA RM sigue estableciendo como medida central la restricción vehicular, pero con un fuerte endurecimiento respecto a la medida implementada en 1998 y actualizada en 2007.

La nueva medida, adicional a la estructura de la medida implementada hasta ahora, contempla la implementación de una restricción permanente entre los meses de mayo y agosto para todos los vehículos con sello verde—con convertidor catalítico—inscritos anteriormente al 1 de septiembre de 2011—anteriores a 2010 para las motocicletas—. Esta medida se implementa con el objetivo de reducir la contaminación y la congestión vial. Adicional a la restricción vehicular, el PPDA RM contempla la posibilidad de implementar un pase diario cuya compra permita circular en días de restricción, considera el aplicar hacia el año 2020 la normativa de emisiones Euro 6—Euro VI para el transporte público—, establecer una Zona de Baja Emisión (LEZ) para camiones al interior del anillo de Américo Vespucio, endurecer la normativa de emisiones para vehículos circulantes – revisión técnica—y generar algún tipo de incentivos para la adquisición de vehículos de baja emisión – en un periodo de 12 meses desde la implementación del plan—²⁴.

Adicional al PPDA RM, en 2014 se implementó un impuesto verde a vehículos, el cual se aplica a vehículos nuevos en base a su valor comercial, su rendimiento de combustible y su emisión de NO_x, la cual ha contribuido a la mejora del parque automotriz.

Si bien, el impuesto verde, los incentivos a la compra de vehículos ecológicos y la implementación de las normativas Euro 6—Euro VI apuntan en la dirección correcta, al generar el marco necesario para la renovación del parque automotriz—con automóviles con las tecnologías vanguardistas en términos ecológicos—, el continuar con la restricción vehicular como piedra angular del plan de descontaminación sin considerar una estrategia integral, parece altamente cuestionable.

La implementación de esta nueva versión de la restricción vehicular en conjunto con el pase, tiene el potencial de ser una política altamente regresiva e inefectiva en términos ecológicos. La evidencia empírica nacional e internacional indica que casi con seguridad la

²⁴ Resolución exenta 1260 del Ministerio del Medio Ambiente. 25 de noviembre de 2015.

restricción fomentará la adquisición de un segundo vehículo—generalmente contaminantes—por parte de los conductores de más recursos, lo cual contribuiría a acrecentar la desigualdad—en la ya altamente desigual sociedad chilena—y a neutralizar la efectividad de la medida para disminuir la contaminación. El pase diario podría tener repercusiones similares, ya que tiene el potencial de generar segregación producto de que sólo aquellos individuos que poseen la capacidad y disposición pagar podrán acceder de forma libre a las zonas restringidas. Adicionalmente, el pase diario es una medida sin precedentes, por lo que, el hecho de que contribuya a neutralizar los incentivos a la adquisición de un segundo vehículo no son más que especulaciones.

Una falencia central del PPDA RM, es que ataca a la contaminación del aire proveniente de fuentes móviles, casi exclusivamente a través de la limitación de la circulación de los vehículos privados, pero no considera medidas integrales que compensen las necesidades de transporte de aquellos individuos a los que se les veta el uso de su automóvil como medio de transporte. Es decir, no contempla el desarrollo de un sistema de transporte público – o de otro modo de transporte – eficiente que sea una alternativa adecuada al uso del automóvil, lo cual puede generar importantes problemas de transporte. En resumen, al igual que el plan original de 1998, puede que el nuevo PPDA RM—para fuentes móviles—sea efectivo en el corto plazo, pero es altamente probable que no sea efectivo ni sostenible en el mediano o largo plazo.

11. Propuesta de política pública

Para tratar el problema de la contaminación ambiental en Santiago, se propone un plan estratégico con cinco focos de acción globales, los cuales son: (I) Control de la demanda por transporte, (II) control de la demanda por el uso de vehículo particular, (III) mejora de eficiencia del transporte público y de otros modos de transporte, (IV) incremento de la eficiencia del parque automotriz, y (V) la generación de cambios conductuales en la población.

(I) Control de la demanda por transporte

Reducir las necesidades de transporte de la población, tendría un impacto sobre la intensidad de uso, y por tanto en las emisiones del sistema de transporte en su conjunto. La estructura de Santiago condiciona notablemente los patrones de movilización dentro de la ciudad, en donde se identifican claros focos de actividad económica en los que se concentra gran parte de las fuentes de trabajo, siendo algunos de los más importantes Santiago Centro, Providencia y Las Condes—eje Alameda, Av. Providencia y Av. Apoquindo—. De acuerdo a la encuesta de Origen y Destino de Santiago (2012), un 41,7% de los viajes hechos en automóvil particular, son de propósito laboral, de los cuales, más de la mitad tiene destino fuera de la zona de residencia – sector oriente, poniente, sur, norte o centro—. Así, mediante una política de desarrollo económico de las comunas, se puede reducir el porcentaje de personas que necesitan movilizarse entre sectores de la capital para poder trabajar o para tener acceso a servicios. Un impacto similar puede tener la política de educación. Por lo tanto, políticas adecuadas de desarrollo económico, laboral y educación, entre otros, pueden contribuir notablemente a reducir la contaminación del aire.

(II) Control de la demanda por vehículos particulares

Para esta línea estratégica, se sugieren 2 políticas, la implementación de una zona de baja emisión y la implementación de un plan de recuperación del espacio público.

Zona de baja emisión (LEZ): La zona de baja emisión sería la medida central del plan estratégico para abordar directamente las emisiones de los vehículos, y se implementaría en reemplazo de la restricción vehicular. Se propone implementar una LEZ por etapas, en las que en cada etapa se incrementa el alcance de la LEZ, a la vez que se endurecen los requerimientos para ingresar a la misma. La LEZ se implementaría inicialmente en las zonas de mayor actividad hacia donde se concentren los viajes, como, por ejemplo, la zona entorno al eje Alameda—Av. Providencia—Av. Apoquindo, y se establecería un sistema de sellos en base a las emisiones de los vehículos, permitiendo entrar sólo a los vehículos menos contaminantes a la LEZ. Conforme la ciudadanía se va adaptando—ya sea actualizando el vehículo o cambiando a otro medio de transporte—y la red de transporte público de va desarrollando, la LEZ se va extendiendo y endureciendo, hasta que, en última instancia, se podría incluso llegar a implementar zonas de ultra baja emisiones—sólo se permite el acceso del transporte público y de vehículos de cero emisiones—

Las LEZ han probado ser efectivas para controlar la contaminación, y, además, en el formato propuesto, es más equitativa en términos socioeconómicos. Primero, en todo el rango de la gama de automóviles—desde pequeños city cars hasta berlinas de lujo—hay vehículos de bajas emisiones, por lo que un gran espectro de la población puede adquirir un vehículo que pueda acceder a las LEZ. Adicionalmente, al no existir un modo de pago que permita eludir la restricción de la LEZ, no se generan situaciones en que individuos con la capacidad y disposición a pagar evadan sistemáticamente la medida, en desmedro de quienes poseen menos recursos, y socavando la efectividad de la medida.

Recuperación del espacio público: Con esta política se propone quitarle terreno sistemáticamente al automóvil en las zonas céntricas y focos neurálgicos de la ciudad, y redestinarlo como espacios comerciales o culturales, vías peatonales, superficies para transportes alternativos—como ciclovías—o destinarlo para mejorar el transporte público. De esta forma se generan incentivos para reducir el uso del automóvil, a la vez que se generan alternativas de transporte eficientes al uso del automóvil y se crean nuevos espacios para la ciudadanía.

(III) Mejoras de la red de transporte urbano

Tener una red de transporte público y de medios alternativos eficiente es necesario para compensar las limitaciones de movilidad impuesta a los automóviles, y más aún, de forma natural puede generar el traspaso desde el automóvil hacia otros medios de transporte. Para lograr esto, se proponen tres medidas: Mejora de la eficiencia del transporte público, desarrollo de una red de ciclovías y la integración modal.

Mejora de la eficiencia del transporte público: Mejorar la eficiencia del transporte público implica avanzar en cuatro aspectos, incrementar el alcance de la red de transporte, incrementar la capacidad de la red, mejorar los tiempos de viaje, y mejorar el consumo energético y sus emisiones. Para lograr esto, es necesario ampliar la red de transporte de cada uno de sus componentes, actualizar tecnológicamente los medios de transporte e incorporar nuevos sistemas de transporte si es posible—por ejemplo, en el espacio recuperado de los vehículos se podría instalar un sistema de tranvías de última generación—.

El Transantiago requiere de una atención especial, ya que ha demostrado no ser capaz de satisfacer de forma eficiente y efectiva las necesidades de movilidad de Santiago. Para mejorar el

Transantiago, una posibilidad es un rediseño basado en el establecimiento de dos tipos de buses, troncales y de alimentación, diferenciados en base a las características de su servicio y de su recorrido. Los buses troncales se encargarían de cubrir la demanda de los motoristas desde la periferia de Santiago hacia los “zonas de negocios”, circulando por vías exclusivas para asegurar su rapidez y puntualidad, mientras que los buses de alimentación se encargarían de cubrir las necesidades de movilización dentro de las zonas de negocios y dentro de zonas definidas en la periferia—sin moverse entre zonas, solo dentro de ellas—. El diseño de las zonas de negocios, cubrirían los sectores de mayor actividad económica, pero abarcando una superficie mayor a las LEZ, de esta forma se podría reducir progresivamente el flujo vehicular desde la periferia hacia las LEZ, optimizando la reducción de las emisiones globales. La implementación de este diseño iría de la mano con el diseño, planificación y desarrollo de las estaciones de integración modal.

Desarrollo de infraestructura para bicicletas: La bicicleta es un excelente medio de transporte para realizar viajes de corta y mediana distancia, a la vez que genera beneficios para la salud. Así, el desarrollo de una red de ciclovías adecuada y segura tiene el potencial de reducir el uso del vehículo en cortas distancias—y de otros medios de transporte—, a la vez que mejora la salud y calidad de vida de sus usuarios. Es importante notar que la infraestructura para facilitar el uso de la bicicleta no se limita a las ciclovías, otras medidas relevantes pueden ser la implementación de vagones de metro en los cuales sea posible transportar bicicletas, o la implementación de semáforos que prioricen la circulación de bicicletas y peatones.

Integración Modal: Un modelo de transporte urbano sustentable, debe permitir utilizar la combinación de medios de transporte óptima para llegar al destino. Para lograr esta integración, es necesario la implementación de nodos estratégicamente ubicados, en los se puedan combinar medios de transporte según las necesidades de cada individuo. La integración modal no solo tiene el potencial de generar viajes más eficientes, sino, que también permite extender el alcance de la red de transporte urbano.

La integración modal puede jugar un papel central en la implementación de una LEZ, así, por ejemplo, un individuo que viva alejado en la periferia podría acercarse hasta una estación de metro donde haya estacionamientos disponibles, ir a la LEZ en metro y moverse dentro de esta caminado o en bicicleta. Mientras mayores combinaciones de transporte se tenga disponible,

mayor es la probabilidad de que el individuo encuentre una alternativa tanto o más eficiente al uso del automóvil.

(IV) Mejora de la eficiencia de vehículos

Los vehículos juegan un rol central en la movilidad urbana y lo seguirán haciendo en el futuro, por esto, aunque se disminuya su participación dentro de los medios de transporte, es necesario mejorar su eficiencia, ya que continuará teniendo un gran impacto. Para mejorar la eficiencia del automóvil, se sugieren dos medidas, renovar tecnológicamente del parque automotriz y mejorar la tasa de uso de los vehículos.

Renovación tecnológica: Chile está bastante avanzado en medidas destinadas a mejorar el parque automotriz, con la implementación del impuesto verde o siendo el país con la normativa de emisiones más estricta de la región—Euro 5—. En este apartado, adicional a lo que la autoridad tiene contemplado, se sugiere implementar un plan de incentivo a la adquisición de vehículos de ultra bajas emisiones, enfocándose en los vehículos eléctricos y en el desarrollo de la infraestructura necesaria para que los vehículos eléctricos sean una alternativa real a un automóvil convencional en el uso cotidiano.

Tasa de uso de vehículos: En Chile, según la EOD (2012), las tasa promedio de ocupación de un vehículo es de 1,4 pasajeros, lo cual deja un amplio margen de mejora. Para optimizar el uso del vehículo, se proponen el incentivar dos prácticas de uso del automóvil, el carpooling—vehículo compartido—y el carsharing—uso temporal de vehículos—. Mediante estas dos modalidades, los usuarios pueden disfrutar de los beneficios que ofrece el automóvil como medio de transporte, a la vez que se reduce la cantidad de vehículos circulando. Para fomentar estas modalidades de uso del automóvil, es necesario trabajar estrechamente con el sector privado, como, por ejemplo, fabricantes de automóviles – como Daimler AG y su servicio car2go—o desarrolladores de software y plataformas—como el servicio carpooling.com—.

(V) Cambios conductuales

En un escenario ideal, la autoridad no tiene la necesidad de implementar políticas y medidas para corregir efectos adversos de la actividad humana—en este caso la contaminación de los automóviles—, ya que los mismos individuos adoptan las acciones y actitudes óptimas desde

la perspectiva social. Este escenario ideal se conceptualiza bajo el supuesto de que todos los individuos tienen un completo y profundo entendimiento de las consecuencias que tienen sus acciones, tanto sobre ellos mismo como sobre el resto de la sociedad y su entorno, lo cual los encamina, junto con un profundo compromiso de vivir en sociedad, a tomar decisiones óptimas desde un punto de vista social, y no solo individual. Para avanzar hacia en la dirección en que los individuos tomen mejores decisiones desde un punto de vista social, es necesario educar a la población, en todos sus niveles, para que desarrollen la empatía y el compromiso social necesarios para tomar este tipo de decisiones. Por esto se propone incorporar de forma extensiva temas de sustentabilidad y problemática medioambiental dentro de los cursos de ciencias en los colegios, e implementar dentro de la malla curricular un curso de educación cívica, donde se traten los problemas sociales y la vida en sociedad—entre otros contenidos—, de cara a formar futuras generaciones comprometidas con el bienestar social y prosperidad sustentable del país. Adicional a esto, se propone continuar realizando campañas para informar a la población respecto a las consecuencias de la contaminación y de cómo cada individuo puede contribuir a tratar el problema.

12. El rol de las comunas

La contaminación afecta de forma desigual a las comunas que conforman el Gran Santiago²⁵, producto de factores geográficos y meteorológicos, como ya se ha mencionado anteriormente. La disparidad en la intensidad de los niveles de polución de las diferentes comunas de la ciudad plantea la necesidad de implementar medidas que se ajusten a la situación particular que enfrenta cada sector, y lo más natural es que cada comuna sea responsable de diseñar e implemente medidas complementarias a las medidas globales impuestas por el PPDA RM.

²⁵ Ver figuras 5 y 6 del presente documento.

En términos generales, las comunas más afectadas por la polución del aire ven reflejada esta situación en tres fenómenos sobre los cuales pueden tomar acción, los cuales son: la población percibe y experimenta con mayor intensidad los efectos de la contaminación, con mayor frecuencia alcanzan altos niveles de contaminación asociados a la declaración de estados críticos, y poseen una mayor concentración media anual de contaminación atmosférica.

Para hacer frente al impacto que tiene los altos niveles contaminación sobre la población, las comunas deben adoptar medidas de contingencia, las cuales puede estar destinadas a aliviar la población, o a disminuir la exposición de la población a la contaminación. Las medidas destinadas a aliviar la población son medidas que se enmarcan en la salud pública, cuyo objetivo es tratar los efectos de la polución sobre la salud de las personas. Un ejemplo es reforzar los servicios de urgencias, para que puedan hacer frente de forma efectiva al aumento de enfermedades respiratorias causadas por la contaminación. Por otro lado, las medidas destinadas a disminuir la exposición, tiene como objetivo reducir la frecuencia y/o intensidad con la que la población se expone a la contaminación. Estas medidas permiten además reducir la carga sobre la red de salud pública, ya que menor exposición implica que una menor proporción de la población desarrolla problemas de salud agudos durante los episodios críticos. Ejemplo de medidas que reduzcan la exposición a la contaminación son: Implementar sistemas de ventilación que minimicen los niveles de contaminación en estaciones de metro, suspender clases durante episodios críticos—la autoridad de las comunas más afectadas pueden adelantar o extender la implementación según sus necesidades—, o fomentar el uso de mascarillas.

Reducir la frecuencia con la que las comunas alcanzan episodios críticos de contaminación, requiere anticipar con mayor antelación la posibilidad de ocurrencia de los mismos, para así poder implementar medidas preventivas pertinentes. Para poder anticipar con suficiente antelación, las comunas requieren tener acceso a la información de los modelos de pronóstico de la contaminación, a la vez que se mejora la precisión y alcance de los mismos. Reducir la magnitud de los niveles máximos de contaminación alcanzados—y la consecuente reducción de la frecuencia de los episodios críticos—permiten reducir la carga sobre el sistema de salud público, ya que previene los aumentos de demanda por salud súbitos—por problema respiratorios principalmente—característicos de los días con niveles críticos de polución del aire. Ejemplos de este tipo de medidas son: adelantar la implementación de medidas que limiten la

intensidad de uso del vehículo o controlar de forma anticipada las emisiones provenientes de las industrias.

El objetivo más difícil de alcanzar es reducir el nivel de emisiones global de forma constante a niveles cercanos al que tienen las comunas más favorecidas. Para lograr este objetivo, se requiere implementar medidas que fomenten una reducción permanente de las emisiones de contaminantes, como, por ejemplo, exigir estándares de emisiones más exigentes a los vehículos que circulan por la comuna o a las industrias ubicadas en la comuna. La implementación de medidas de este tipo a nivel comunal enfrenta dos grandes obstáculos. Primero, este tipo de medidas suelen ser más complejas de diseñar e implementar, lo cual está asociado a mayores costos. Y segundo, las medidas de impacto local son poco efectivas para atacar los problemas de polución del aire, tanto a nivel local como global, producto del fenómeno de hominización y expansión de la polución del aire—condicional a factores geográficos y climatológico—. Estos dos aspectos, desincentivan la adopción de medidas particulares, cuando los demás involucrados dentro de un área no están adoptando—o están comprometidos a adoptar—medidas equivalentes o complementarias.

El lograr la implementación de medidas ambientales a nivel comunal que sean eficientes y efectivas, requiere que las comunas—y otras partes involucradas—trabajen de forma coordinada, de forma tal de que se generen sinergias que maximicen el impacto de las medidas y no que se generen barreras u obstrucciones entre ellos que mermen la efectividad de las medidas. Una medida que puede incentivar la implementación de medidas de nivel comunal es la creación de alianzas de cooperación entre las comunas afectadas, las cuales permiten compartir información, y coordinar esfuerzos y recursos.

Otra opción es crear un marco que fomente que las comunas incrementen sus esfuerzos a reducir las emisiones. Un ejemplo de esto es el implementar un impuesto verde sobre la repartición del fondo común municipal en base al aporte que hace cada comuna al nivel total de polución en Santiago. De esta forma, las comunas tienen un incentivo económico para reducir de forma voluntaria sus emisiones.

13. Conclusiones

La restricción vehicular es una medida de descontaminación típicamente implementada en países en desarrollo, en contraste con las naciones industrializadas, las cuales prefieren medidas como los cargos por emisiones o las zonas de bajas emisiones. Santiago de Chile fue pionera en su implementación a mediados de la década de los 80's, y desde la implementación del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana en 1998, la restricción vehicular ha sido la política angular para abordar el problema de las emisiones de contaminantes provenientes de fuentes móviles.

Este trabajo se suma a otros previos, al analizar la efectividad de la restricción como medida medioambiental en Santiago de Chile, aportando a la discusión mediante la incorporación de un análisis de la evolución de su efectividad en el tiempo, al evaluar su formato original implementado en 1998 y su actualización implementada en 2007 de forma separada. Los resultados de este estudio sugieren que, en su implementación inicial en 1998—bajo el marco del PPDA RM—, la restricción vehicular contribuyó a mejorar notablemente la calidad del aire en Santiago, disminuyendo los niveles de CO y de MP₁₀. Sin embargo, los resultados sugieren que la actualización de la medida implementada en 2007 no logra los mismos resultados con respecto a mejorar los niveles de contaminación de aire, y más aún, se asociaría a un incremento importante de los niveles de MP₁₀.

A partir de los resultados obtenidos surge la necesidad de replantear el plan de acción con el que se está abordando el problema de la polución del aire, y particularmente, plantea la necesidad de reconsiderar la restricción vehicular como medida ambiental.

En el desarrollo de este documento se entrega un análisis estructurado de los principales factores que condicionan o influyen la efectividad de la restricción vehicular—y de cualquier otra medida de descontaminación del aire—, y de los enfoques para diseñar e implementar soluciones de movilidad urbana sustentable, desde una perspectiva más amplia que la meramente medioambiental. A partir del marco desarrollado, se hace evidente la necesidad de abordar la polución del aire con una estrategia integral, que ataque simultáneamente, y de forma sistemática, los diferentes factores que terminan los niveles contaminación. El diseño de un plan

estratégico adecuado requiere la realización de rigurosos estudios técnicos y económicos ex ante, de las potenciales políticas medioambientales, incorporando, además, las interacciones entre las diferentes medidas de los planes de descontaminación, para así poder identificar la posible generación de sinergias u obstrucciones entre las mismas.

Este trabajo supone un eslabón más, en la cadena de estudios del problema de polución en Santiago. El siguiente paso en la profundización del entendimiento del problema de contaminación de la capital, es estudiar y definir las necesidades específicas de cada comuna de Santiago, y de que manera contribuye cada una a la contaminación global de la cuenca. Definir el cómo cada comuna contribuye a la polución, permite desarrollar medidas específicas y diferenciadas, lo cual incrementa la efectividad y eficacia con que se combate la contaminación, a la vez que se reducen las pérdidas de bienestar que se producen al aplicar medidas transversales que puedan ser injustas o inadecuadas para ciertas comunas. Adicionalmente, identificar las necesidades de cada comuna, permite tomar medidas más adecuadas, resultando en una mejora de la calidad de vida de la población. Las comunas deben ser entendidas como una entidad más, que debe hacerse cargo del costo social que las externalidades de sus actividades generan sobre el resto de comunas, por lo tanto, el óptimo es diferenciar las externalidades que cada comuna genera, y buscar el mecanismo que limite o internalice dicho costo.

Es relevante destacar la influencia que políticas destinadas a otras áreas pueden tener sobre el impacto del transporte en la calidad del aire. Las políticas destinadas a controlar directamente las emisiones, o a limitar la circulación de los vehículos son efectivas para tratar el problema de la polución del aire proveniente de fuentes móviles, pero no atacan la raíz del problema, el cual es la intensidad de la necesidad de transportarse. Una política económica adecuada acompañada de un diseño urbano estratégicamente pensado tiene el potencial de redefinir los patrones de movilización de las urbes, y, por tanto, cambiar las necesidades de transporte. Fomentar un progreso económico equilibrado entre las comunas de la capital—y de regiones, para reducir la migración hacia Santiago—, generando un desarrollo urbano más compacto e inteligente, que permita un desarrollo de la vida urbana de manera local, se presenta como una política de largo plazo altamente efectiva para abordar el problema de contaminación del aire que afecta a Santiago, a través de una reducción natural de la utilización del vehículo y de otros medios de transporte motorizados en el área urbana.

14. Referencias

- Agarwal, O. (2014). *Toward sustainable and energy efficient urban transport. Energy efficient cities* (Knowledge Series 020/14, Mayoral guidance note 4). Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP).
- Andersson, C. and Engardt, M. (2010). *European ozone in a future climate*. Journal of Geophysical Research.
- AP EnvEcon. (2009). *Theory of pollution control. A short overview of C&C and MB*.
- Asociacion Nacional Automotriz de Chile. (2016). *Anuario 2015/2016*.
- Auffhammer, M. & Kellogg, R. (2011). *Clearing the air? The effects of gasoline content regulation on air quality*. American Economic Review, 101, 2687–2722.
- Branco G. M., Blumberg K, & Walsh M. P. (2004). *Benefits versus costs: Low Sulphur fuels and tight vehicle standards in Brazil, presentation in São Paulo, Brazil*. December 2003.
- Böhler-Baedeker, S., Kost, C. & Merforth, M. (2014). *Urban mobility plans. National approaches and local practice. Moving towards strategic, sustainable and inclusive transport planning* (Sustainable urban transport technical document 13). Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit/Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit.
- Bontoft, C., Carbone, R., Almena, M., Farenback-Brateman, J., Gueit, J., Hovius H., Jackson, A., Kolbeck, A., Lehto, K., Maroto de Hoyos, S., Mason, S., Mirabella, W., Rebesco, E., Taylor, B., Van de Heijning, P & Williams, J. (2016). *Phase I: Effect of Fuel Octane on the Performance of Two Euro 4 Gasoline Passenger Cars*. CONCAWE (report no. 13/16).
- Calonico, S., Cattaneo, M. & Titiunik, R. (2014). *Robust data-driven inference in the regression-discontinuity design*. The Stata Journal, 14(4), 909-946.

- Calonico, S., Cattaneo, M., Farrell, M. & Titiunik, R. (2017). *Rdrobust: Software for regression discontinuity design*. The Stata Journal, 17(2), 372-404.
- Cantillo, V., & Ortuzar, J. (2011). *Restricting cars by license plate numbers: An erroneous policy for dealing with transport externalities*. Universidad del Norte, Colombia.
- Cantillo, V. & Ortúzar, J. (2012). *Restricción vehicular según número de patente: Requiem para una política errónea*. Revista Ingeniería de Sistemas, 26.
- Cantillo, V. & Ortúzar, J. (2014). *Restricting the use of cars by license plate numbers: A misguided urban transport policy*. DYNA, 81(188), 75-82.
- Crimmins, A., J. Balbus, J.L. Gamble, C.B. Beard, J.E. Bell, D. Dodgen, R.J. Eisen, N. Fann, M.D. Hawkins, S.C. Herring, L. Jantarasami, D.M. Mills, S. Saha, M.C. Sarofim, J. Trtanj, & L. Ziska, Eds. (2016). *The Impacts of Climate Change on Human Health in the United States: A Scientific Assessment*. U.S. Global Change Research Program, 2016. Washington, DC.
- CONCAWE. (2004). *Fuel effects on emissions from modern gasoline vehicles part 2 – aromatics, olefins and volatility effects*. (Report 2/04). Bruselas, Bélgica.
- Daly, A. & Zannetti, P. (2007). *Air pollution modeling – An overview. Chapter 2 of ambient air pollution*. The Arab School for Science and Technology & The EnviroComp Institute.
- Davis, L. (2008). *The effect of driving restrictions on air quality in Mexico City*. Journal of Political Economy 116: 38-81.
- Dai, P., Ge, Y., Lin, Y., Su, S. & Liang, B. (2013). *Investigation on characteristics of exhaust and evaporative emissions from passenger cars fueled with gasoline/methanol blends*. Fuel, 113, 10–16.
- De Grange, L. & Troncoso, R. (2011). *Impacts of vehicle restrictions on urban transport flows: The case of Santiago, Chile*. Transport Policy, 18, 862–869.
- De Grange, L. & Troncoso, R. (2015). *Límites de la tarificación vial*. EURE, 41(122), 167-184.

- Air Quality Expert Group. (2007). *Air quality and climate change: A UK Perspective*. Department for Environment, Food and Rural Affairs, Scottish Executive, Welsh Assembly Government & Department of the Environment in Northern Ireland.
- Department of Transport, United Kingdom. (2016). *Vehicle Emissions Testing Programme. Moving Britain Ahead*. Recuperado de https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/548148/vehicle-emissions-testing-programme-web.pdf
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. (n.d.). *Sustainable urban transport: Avoid-Shift-Improve(A-S-I)* [Broucher]. On behalf of Federal Ministry for Economic Cooperation and Development, Germany. Recuperado de http://www.sutp.org/files/contents/documents/resources/E_Fact-Sheets-and-Policy-Briefs/SUTP_GIZ_FS_Avoid-Shift-Improve_EN.pdf
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. (2015). *Introduction to Congestion charging. A guide for practitioners in developing cities*.
- Diab, R. (n.d.). *National Air Quality Management Programme. Phase II transition project*. Air pollution meteorology (publication series B: Book 2). Department of Environmental Affairs and Tourism. South Africa.
- Elliott, M., Nebel, G. & Rounds, F. (1955). *The composition of exhaust gases from diesel, gasoline and propane powered motor coaches*. Journal of the Air Pollution Control Association, 5(2), 103-108.
- Eskeland, G., & Feyzioglu, T. (1997). *Rationing can backfire: The "day without a car" in Mexico City*. The World Bank Economic Review, 11, 383-408.
- Fresard, F. (1998). *In Efecto real de la restricción vehicular en Santiago de Chile*. Actas X congreso panamericano de ingeniería de tránsito y transporte, Santander, España septiembre 21 a 24, 1998.
- European Commission. (2017). *Climate change consequences*. Recuperado de https://ec.europa.eu/clima/change/consequences_en

- European Environment Agency. (2016a). *Explaining road transport emissions: A non-technical guide*.
- European Environment Agency. (2016b). *Transitions towards a more sustainable mobility system. TERM 2016: Transport indicators tracking progress towards environmental targets in Europe* (EEA Report 34/2016).
- European Environment Agency. (2017). *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report*. (EEA Report, 1/2017).
- Gallego, F., Montero, J.P. & Salas, C. (2013). *The effect of transport policies on car use: A bundling model with applications*. *Energy Economics*, 40, 85–97.
- Garreaud, R. & Rutllant, J. (2006). *Factores meteorológicos de la contaminación atmosférica en Santiago. Capítulo 2 en episodios críticos de contaminación atmosférica en Santiago*. R. Morales Ed. Colección de química ambiental, Editorial Universitaria, 36-53.
- German Partnership for Sustainable Mobility. (2015a). *Clean air-Made in Germany*.
- German Partnership for Sustainable Mobility. (2015b). *Zero and low carbon mobility. Ideas-Made in Germany*.
- Gibson, M. & Carnovale, M. (2015). *The effects of road pricing on driver behavior and air pollution*. *Journal of Urban Economics*, 89, 62-73.
- Ghose, M.K. 2002. “Controlling of motor vehicle emissions for a sustainable city.” TERI. Information Digest on Energy and Environment 1(2), 273–88.
- Gorham, R. (2002). *Air pollution from ground transportation. an assessment of causes, strategies and tactics, and proposed actions for the international community*. United Nations.
- Grundström, M. (2015). *The influence of atmospheric circulation and meteorology on urban air pollution and pollen exposure*. Department of Biological and Environmental Sciences, Faculty of Sciences, University of Gothenburg. Recuperado de https://gupea.ub.gu.se/bitstream/2077/38728/1/gupea_2077_38728_1.pdf

- Hammadou, H. & Papaix, C. (2014). *Which policy tools to move towards low carbon mobility?* Hyard, A. (Ed.), non-technological innovations for sustainable transport. four transport case studies (pp. 5-25). París, Francia. Springer International Publishing.
- Harrington, W. & Morgenstern, D. (2004). *Economic incentives versus command and control. What's the best approach for solving environmental problems?* Recuperado de http://www.rff.org/files/sharepoint/WorkImages/Download/RFF_Resources_152_ecoincentives.pdf
- Health Effect Institute. (2017). *State of global air 2017. A special report of global exposure to air pollution and its disease burden.*
- Hitchcock, G., Conlan, B., Kay, D., Brannigan, C. & Newman, D. (2014). *Air quality and road transport. Impacts and solutions.* Royal Automobile Club Foundation for Motoring.
- Holman, C., Harrison, R. & Querol, X. (2015). *Review of the efficacy of low emission zones to improve urban air quality in European cities.* Atmospheric Environment, 111, 161-169
- Huang, H., Fu, D. & Qi, W. (2017). *Effect of driving restrictions on air quality in Lanzhou, China: Analysis integrated with internet data source.* Journal of Cleaner Production, 142, 1013- 1020.
- Imbens, Guido, and Karthik Kalyanaraman. 2009. *Optimal Bandwidth Choice for the Regression Discontinuity Estimator.* NBER WP 14726.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
- International Energy Agency. (2016). *Energy and air pollution. World energy outlook. Special report.*
- Jacob, D. & Winner, D. (2009). *Effect of climate change on air quality.* Atmospheric Environment, 43(1), 51–63.
- Jacobsen, R. (2013). *Evaluating US Fuel Economy Standards in a Model with Producer and Household Heterogeneity.* American Economic Journal: Economic Policy, 5(2), 148–187.

- Jia, N., Zhang, Y., He, Z. & Li, G. (2015). *Commuters' acceptance of and behavior reactions to license plate restriction policy: A case study of Tianjin, China*. Transportation Research Part D.
- Karagulian, F., Belis, C., Francisco, C., Dora, C., Prüss-Ustün, A., Bonjour, S., Adair-Rohani, H., & Amann, M. (2015). *Contributions to cities' ambient particulate matter: A systematic review of local source contributions at global level*. Atmos. Environ. 120, 475–483.
- Lane, Zeng, Dhingra & Carrigan. (2015). *Carsharing. A vehicle for sustainable mobility in emerging markets?* World Resources Institute.
- Lewis, W. (1936). *The Significance of Transportation to Civilization*. Recuperado de <http://www.jstor.org/stable/1019605> (07/04/2017)
- Liu Y, Yan, Z. & Dong, C. (2016). *Health implications of improved air quality from Beijing's driving restriction policy*. Environmental Pollution, 219, 323-328.
- Malmö Stad. (2016). *Sustainable urban mobility plan. Creating a more accesible Malmö*.
- Martínez, P. B. *Evolución de la Calidad del Aire en Santiago 1997 / 2004*. Recuperado de http://www.sinia.cl/1292/articles-39731_recurso_1.pdf
- Ministerio del Medio Ambiente. (2015). *Resolución Exenta 1260: Aprueba anteproyecto del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana de Santiago*.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2017). *Presentación Tercera Encuesta Nacional del Medio Ambiente*. Recuperado de <http://portal.mma.gob.cl/tercera-encuesta-nacional-del-medio-ambiente/>
- Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (1996). *Decreto Supremo 131: Declara zona saturada por ozono, material particulado, respirable, partículas en suspensión y monóxido de carbono, y zona latente por dióxido de nitrógeno, al área que indica*.
- Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (1998). *Decreto Supremo 16: Establece Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana*.

Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (1998). *Decreto 59: Establece norma de calidad primaria para material particulado respirable mp10, en especial de los valores que definen situaciones de emergencia* .

Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (2000). *Modifica D.S. N°16, de 1998, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia*.

Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (2001). *Decreto 45: Modifica decreto n° 59, de 1998, que establece la norma de calidad primaria para material particulado respirable MP₁₀*.

Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (2004). *Reformula y actualiza Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana*.

Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (2007). *Revisa, reformula y actualiza el capítulo xiv, "Plan operacional para enfrentar episodios críticos de contaminación", del decreto n N°58 de 2003, que reformulo y actualizo el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana*.

Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (2010). *Decreto 66: Revisa, reformula y actualizar Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana*. Recuperado desde <https://www.leychile.cl/N?i=1012499&f=2010-04-16&p=>

Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. (2012). *Informe ejecutivo. Encuesta Origen Destino de Viajes, 2012*. Programa de Vialidad y Transporte Urbano: SECTRA

Mullins, J. & Bharadwaj, P. (2013). *Effects of Short Term Measures to Curb Air Pollution: Evidence from Santiago, Chile*. Recuperado de https://prbharadwaj.files.wordpress.com/2012/03/chile_temp_interventions_draft_3_21_2013.pdf

Nurul Amin, A. (2009). *Reducing emissions from private cars: Incentive measures for behavioral change*. United Nations Environment Program.

Organization for Economic Co-operation and Development. (2016). *Air pollution to cause 6-9 million premature deaths and cost 1% GDP by 2060*. Recuperado de

<http://www.oecd.org/env/air-pollution-to-cause-6-9-million-premature-deaths-and-cost-1-gdp-by-2060.htm>

O’Ryan, R. & Larraguibel, L. (n.f.) *Contaminacion del aire en santiago:estado actual y 6soluciones*. Recuperado de dii.uchile.cl/progea/publicaciones/cont%20aire%20stgo.pdf

Panteliadis, P., Strak, M., Hoek, G., Weijers, E., van der Zee, S. & Dijkema, M. (2014). *Implementation of a low emission zone and evaluation of effects on air quality by long-term monitoring*. *Atmospheric Environment*, 86, 113-119.

Rosqvist, L. (n.f.). *Vehicular emissions and fuel consumption for street characteristics in residential areas*. Traffic Planning, Department of Technology and Society, Lund University, Sweden. recuperado de www.lth.se/fileadmin/tft/dok/KFBkonf/1R_Smidfelt.PDF

Schipper, L., Celine, M-L. & Gorham, R., 2000. *Flexing the link between transport and green house gas emissions: a path for the World Bank*.

Shenfeld, L. (1970a). *Meteorological aspects of air pollution control*. *Atmosphere*, 8(1), 3-13.

Shenfeld, L. (1970b). *Meteorological aspects of air pollution control*. Department of Energy and Resources Management., Ontario, Canada. Recuperado de https://archive.org/stream/meteorologicalas00shen/METEOROLOGICALAS_00_SHEN_03928_djvu.txt

Sims R., R. Schaeffer, F. Creutzig, X. Cruz-Núñez, M. D’Agosto, D. Dimitriu, M.J. Figueroa Meza, L. Fulton, S. Kobayashi, O. Lah, A. McKinnon, P. Newman, M. Ouyang, J.J. Schauer, D. Sperling, and G. Tiwari (2014). *Transport*. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

State of Green. (2016). *Sustainable urban transportation. Creating green livable cities* (ThinkDenmark, white papers for a green transportation).

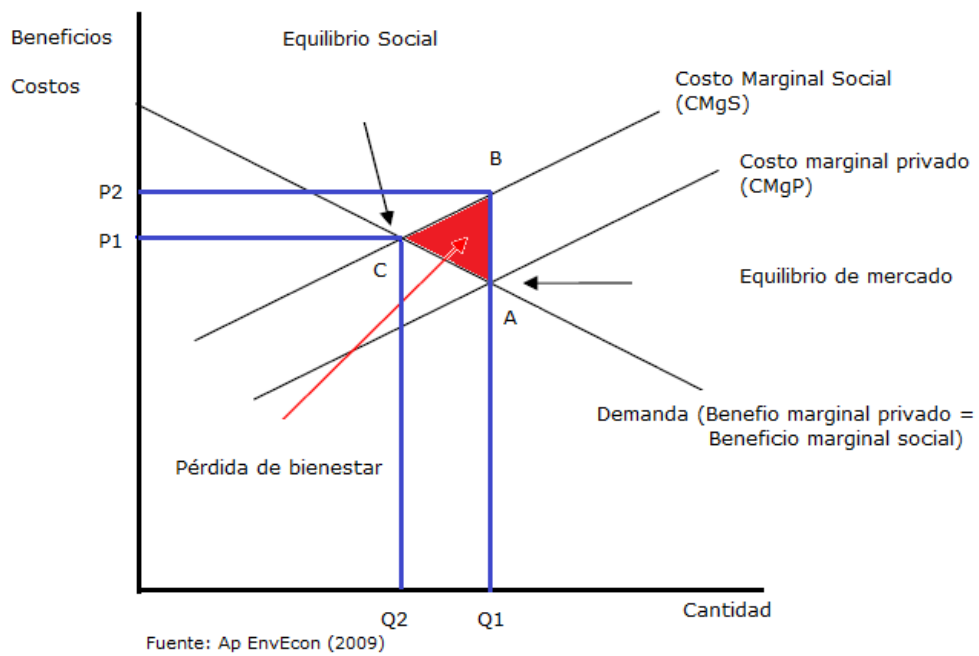
Subsecretaría de Transportes. (2013). *Plan maestro de transporte de Santiago 2025*. Santiago, Chile.

- Swaney, J. (1992). *Market versus Command and Control Environmental Policies*. Journal of Economic Issues, 26(2), 623-633.
- Tietge, U., Díaz, S., Mock, P., German, J., Bandivadekar, A. & Ligterink, N. (2016). *From laboratory to road. A 2016 update of official and 'real-world' fuel consumption and CO2 values for passenger cars in Europe*. ICCT.
- United Nations Human Settlements Programme. (2012). *Urban patterns for a green economy. Leveraging density*.
- United Nations Centre for Human Settlements. (2001). *The role of urban transport in sustainable human settlements development*. Commission on Sustainable Development, ninth session (16-17 abril), New York.
- Universidad de Santiago de Chile. (2014). *Estudio "Actualización y sistematización del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la Región Metropolitana"*.
- U.S. Environmental Protection Agency. (1979). *Effect of Ambient Temperature on Vehicle Emissions and Performance Factors*. Recuperado de nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=9100XT43.TXT
- U.S. Environmental Protection Agency. (2006). *Cold temperature effects on vehicle HC emissions: Draft report*. Recuperado de nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1004KRV.TXT
- U.S. Environmental Protection Agency. (2010). *2010-2014 Pollution Prevention (P2) Program: Strategic Plan*.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2014). *Greenhouse gas emissions from a typical passenger vehicle*. Recuperado de <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-02/documents/420f14040a.pdf>.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2016). *Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling (SCRAM). Air Quality Models*. Recuperado de <https://www3.epa.gov/ttn/scram/aqmindex.htm>

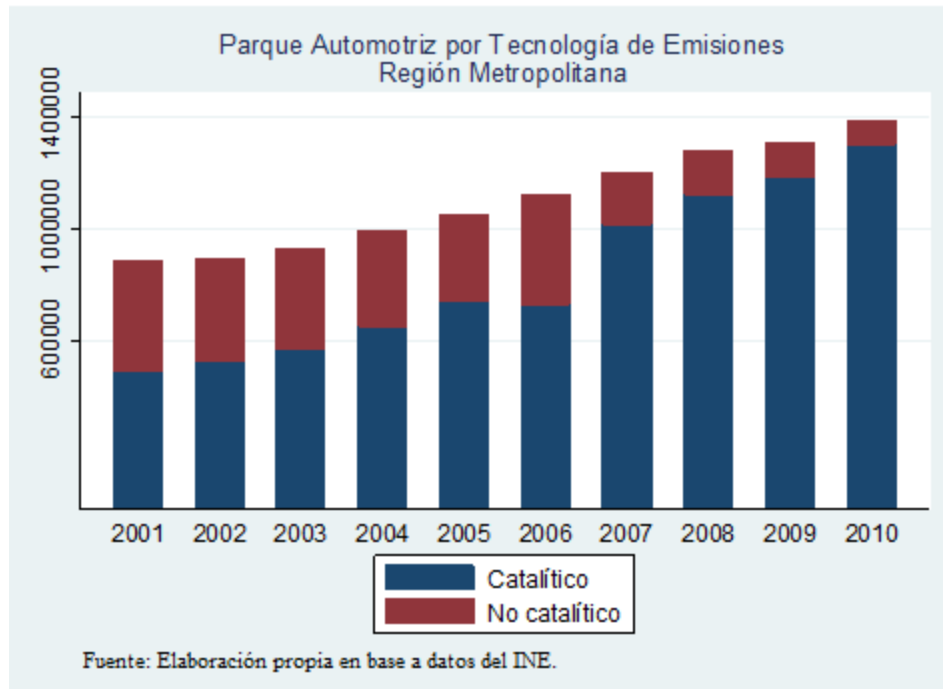
- Wefering, F., Rupprecht, S., Bührmann, S. & Böhler-Baedeker, S. (2014). *Guidelines. Developing and Implementing a Sustainable Urban Mobility Plan. European Platform on Sustainable Urban Mobility Plans.*
- World Bank and Institute for Health Metrics and Evaluation. (2016). *The Cost of Air Pollution: Strengthening the Economic Case for Action.* Washington, DC.
- Wolff, H. and L. Perry. (2010). *Trends in Clean Air Legislation in Europe: Particulate Matter and Low Emission Zones*". *Review of Environmental Economics and Policy.* 4(2), 293-308.
- World Meteorological Organization. (2016). *WMO Statement on the State of Global Climate in 2016* (wmo, 1189)
- Zegras, P. C. (2007). *As if Kyoto mattered: the clean development mechanism and transportation.* *Energy Policy,* 35, 5136-5150.
- Zhang, K., Batterman, S. & Dion, F. (2011). *Vehicle emissions in congestion: Comparison of work zone, rush hour and free-flow conditions.* *Atmospheric Environment,* 45, 1929-1939
- Zhang, W., Lin Lawell, C. & Umanskaya, V. (2017). *The effects of license plate-based driving restrictions on air quality: Theory and empirical evidence.* *Journal of Environmental Economics and Management,* 82, 181–220.

15. Anexos

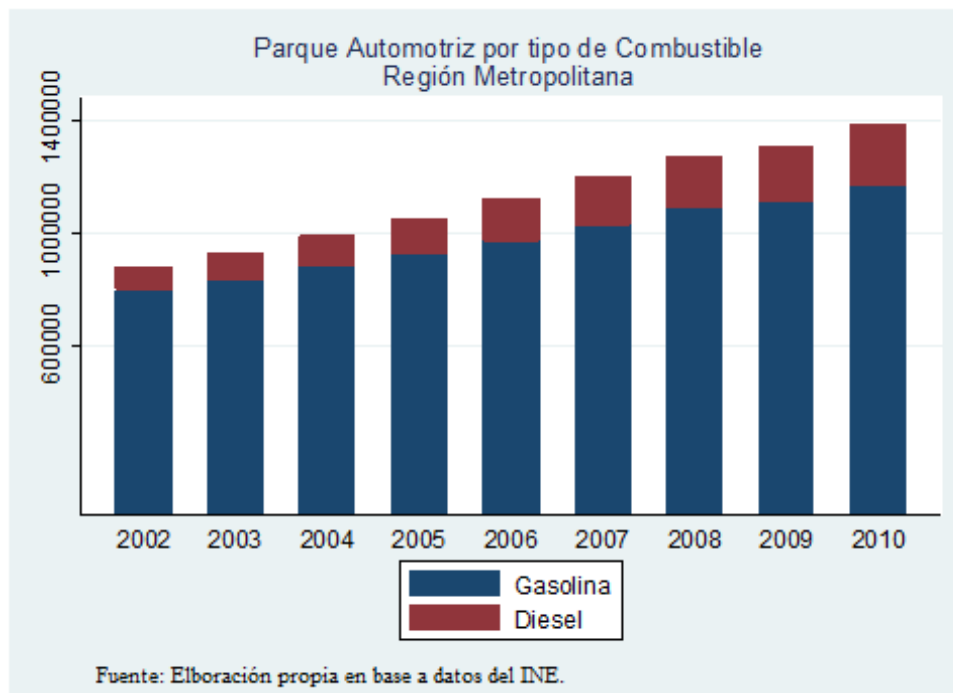
Anexo 1: Pérdida de bienestar causada por la contaminación del aire.



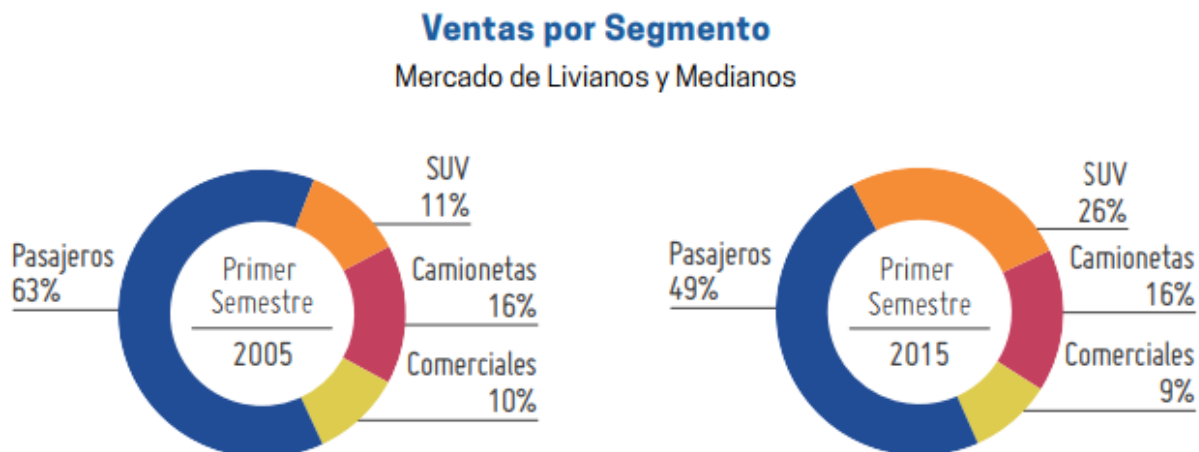
Anexo 2: Parque automotriz de la Región Metropolitana clasificado por tecnología de emisiones, 2001-2010.



Anexo 3: Parque automotriz de la Región Metropolitana clasificado por tipo de combustible, 2002-2010.



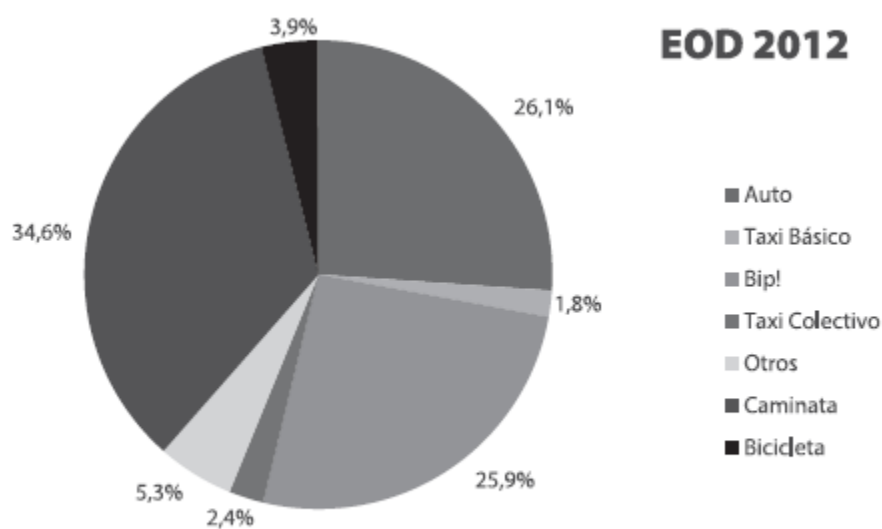
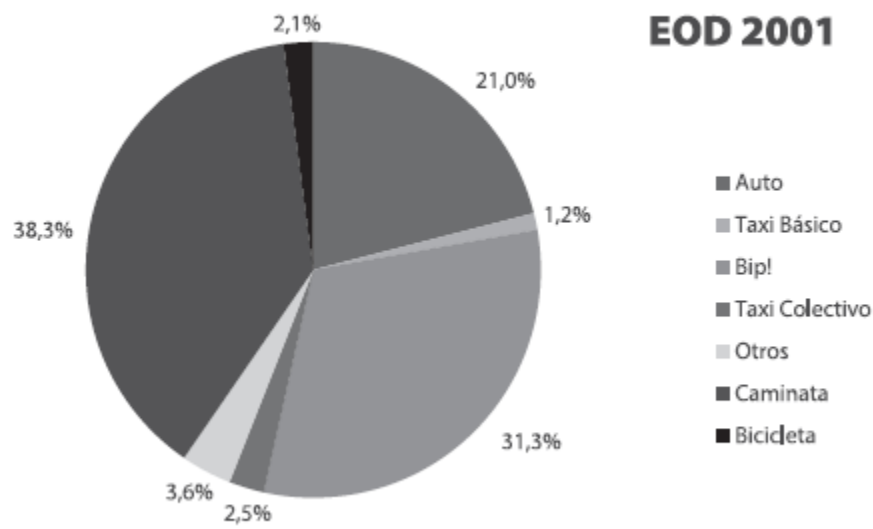
Anexo 4: Ventas de automóviles livianos nuevos por tipo, primer semestre de 2005 y 2015.



Fuente: Anuario ANAC 2015/2016, página 45.

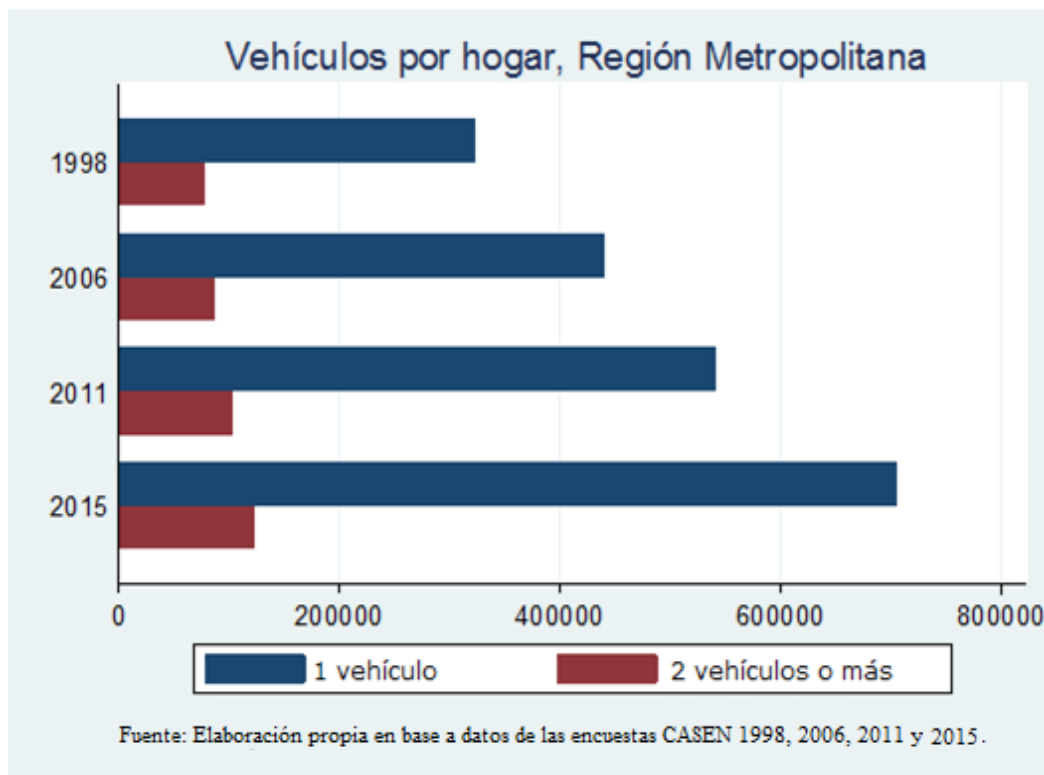
Anexo 5: Partición modal de viajes en un día laboral en la Región Metropolitana, EOD 2001 y EOD 2012.

Partición modal de viajes en un día laboral normal



Fuente: Informe ejecutivo. Encuesta Origen Destino de Viajes 2012 de Santiago. Figura 31, página 72.

Anexo 6: Posesión de vehículos por hogar, años 1998, 2008, 2011 y 2015.



Anexo 7: Resultados regresión MCO, especificación principal.

Tabla A: Regresión MCO, MP₁₀

Variables	Periodo					
	1997-1999	1997-2000	1997-2001	2006-2008	2005-2009	2004-2010
IMACEC	-0.0137 (0.00840)	-0.0246*** (0.00871)	-0.0218*** (0.00834)	0.00677 (0.00824)	0.000333 (0.00572)	-0.00367 (0.00369)
Feb.	0.0289 (0.0710)	-0.0626 (0.0687)	-0.0495 (0.0634)	0.0782 (0.0710)	0.0337 (0.0512)	0.0127 (0.0393)
Mar.	0.214*** (0.0783)	0.347*** (0.0744)	0.326*** (0.0729)	0.0411 (0.109)	0.0974 (0.0788)	0.155*** (0.0527)
Abr.	0.317*** (0.0939)	0.368*** (0.0868)	0.325*** (0.0818)	0.233*** (0.0857)	0.215*** (0.0657)	0.196*** (0.0590)
May.	0.461*** (0.0984)	0.427*** (0.0948)	0.387*** (0.0908)	0.297*** (0.107)	0.212** (0.0827)	0.230*** (0.0711)
Jun.	0.351*** (0.101)	0.256*** (0.0957)	0.245*** (0.0918)	0.255** (0.0984)	0.228*** (0.0802)	0.231*** (0.0702)
Jul.	0.356*** (0.108)	0.289*** (0.105)	0.293*** (0.102)	0.115 (0.107)	0.0771 (0.0862)	0.103 (0.0743)
Ago.	0.248**	0.204**	0.170*	0.0213	-0.0213	-0.0187

	(0.0986)	(0.0937)	(0.0906)	(0.0937)	(0.0834)	(0.0689)
Sep.	-0.00634	-0.0448	-0.0718	-0.000714	-0.0463	-0.0449
	(0.0949)	(0.0867)	(0.0833)	(0.0860)	(0.0665)	(0.0557)
Oct.	0.0452	0.0660	0.0581	-0.0443	-0.0417	-0.0201
	(0.0635)	(0.0578)	(0.0533)	(0.0692)	(0.0542)	(0.0460)
Nov.	-0.0258	-0.0168	-0.0251	-0.000405	0.0209	0.00430
	(0.0576)	(0.0496)	(0.0430)	(0.0507)	(0.0405)	(0.0364)
Dic.	-0.0256	0.0570	0.0529	-0.0396	0.0326	0.0480
	(0.0589)	(0.0549)	(0.0479)	(0.0773)	(0.0602)	(0.0482)
1998	0.000590	0.0317	0.0354			
	(0.0359)	(0.0358)	(0.0375)			
1999	-0.119***	-0.0998**	-0.0905**			
	(0.0423)	(0.0422)	(0.0427)			
2000		0.00212	-0.00839			
		(0.0576)	(0.0565)			
2001			-0.0173			
			(0.0766)			
2005						0.00462
						(0.0349)
2006					0.0360	0.0589
					(0.0432)	(0.0477)
2007				-0.119**	-0.0626	-0.0248
				(0.0533)	(0.0690)	(0.0671)
2008				-0.0411	0.0459	0.104
				(0.0827)	(0.0896)	(0.0767)
2009					0.0311	0.0758
					(0.0819)	(0.0728)
2010						0.0824
						(0.0924)
Fin semana	-0.0877***	-0.110***	-0.105***	-0.0738***	-0.0904***	-0.106***
	(0.0170)	(0.0157)	(0.0145)	(0.0158)	(0.0135)	(0.0115)
Vel. Veinto	-0.274***	-0.273***	-0.297***	-0.311***	-0.304***	-0.301***
	(0.0295)	(0.0242)	(0.0253)	(0.0380)	(0.0252)	(0.0188)
Temp.	0.0510**	0.0472**	0.0360**	0.0200	0.0364***	0.0359***
	(0.0228)	(0.0189)	(0.0165)	(0.0151)	(0.0129)	(0.0110)
T. P. Rocío	-0.0320*	-0.0280	-0.0192	0.0164	0.00466	-0.00135
	(0.0193)	(0.0175)	(0.0138)	(0.0117)	(0.0103)	(0.00843)
Precip.	-0.415***	-0.299***	-0.172***	-0.156***	-0.162***	-0.174***
	(0.0593)	(0.0416)	(0.0167)	(0.0196)	(0.0161)	(0.0153)
Vel. Veinto^2	0.0145***	0.0140***	0.0157***	0.0176***	0.0152***	0.0150***
	(0.00223)	(0.00191)	(0.00217)	(0.00355)	(0.00205)	(0.00142)
Temp.^2	-5.71e-05	2.01e-06	0.000338	0.000116	-0.000346	-0.000213
	(0.000687)	(0.000583)	(0.000510)	(0.000498)	(0.000384)	(0.000332)
T. P. Rocío^2	-0.000155	0.000247	-0.000277	-0.00184**	-0.000815	-0.000574
	(0.00123)	(0.00113)	(0.000883)	(0.000863)	(0.000739)	(0.000615)

Precip.^2	0.0314*** (0.00565)	0.0170*** (0.00350)	0.00493*** (0.000624)	0.00526*** (0.000824)	0.00572*** (0.00101)	0.00634*** (0.00116)
Vel. Veinto(-1)	-0.0488* (0.0281)	-0.0559** (0.0238)	-0.0598** (0.0236)	-0.0919*** (0.0255)	-0.0525*** (0.0201)	-0.0595*** (0.0155)
Temp.(-1)	-0.0172 (0.0170)	-0.0123 (0.0148)	0.00188 (0.0141)	-0.0114 (0.0159)	-0.0117 (0.0127)	-0.000673 (0.0109)
T. P. Rocío(-1)	-0.0294* (0.0169)	-0.0334** (0.0156)	-0.0416*** (0.0120)	-0.0369*** (0.0117)	-0.0380*** (0.0100)	-0.0431*** (0.00826)
Precip.(-1)	-0.115*** (0.0392)	-0.0609** (0.0234)	-0.0416*** (0.0119)	-0.0337** (0.0136)	-0.0540*** (0.0121)	-0.0466*** (0.0102)
Vel. Veinto(-1)^2	0.00213 (0.00220)	0.00225 (0.00179)	0.00259 (0.00191)	0.00570*** (0.00205)	0.00220 (0.00152)	0.00290*** (0.00108)
Temp.(-1)^2	0.00125** (0.000547)	0.000966** (0.000476)	0.000637 (0.000445)	0.00104* (0.000544)	0.00113*** (0.000396)	0.000733** (0.000343)
T. P. Rocío(-1)^2	0.000154 (0.00102)	0.000233 (0.000953)	0.000780 (0.000731)	0.000833 (0.000810)	0.000974 (0.000695)	0.00127** (0.000574)
Precip.(-1)^2	0.00758** (0.00383)	0.00303* (0.00177)	0.00121*** (0.000346)	0.00190*** (0.000525)	0.00272*** (0.000510)	0.00247*** (0.000438)
RV 1998	-0.0817 (0.0577)	-0.0332 (0.0544)	-0.0158 (0.0525)			
RV 2007				0.0451 (0.0533)	0.124*** (0.0422)	0.133*** (0.0343)
Constant	6.454*** (0.769)	7.419*** (0.796)	7.204*** (0.759)	4.518*** (0.904)	5.067*** (0.646)	5.469*** (0.400)
Observations	999	1,365	1,730	1,096	1,826	2,557
R-squared	0.696	0.678	0.663	0.659	0.642	0.641

Resultados son robusto contra heteroscedasticidad y autocorrelación dentro de un cluster de 1 semana. Errores estándar en paréntesis: *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Tabla B: Regresión MCO, CO

Variables	Periodo					
	1997-1999	1997-2000	1997-2001	2006-2008	2005-2009	2004-2010
IMACEC	-0.0219** (0.00854)	-0.0268*** (0.00823)	-0.0172** (0.00799)	-0.0187* (0.0102)	0.00119 (0.00743)	-0.00816 (0.00499)
Feb.	-0.0344 (0.0827)	-0.0510 (0.0696)	-0.0269 (0.0674)	-0.0336 (0.0827)	0.0861 (0.0723)	-0.0522 (0.0618)
Mar.	0.493*** (0.0826)	0.562*** (0.0792)	0.481*** (0.0761)	0.605*** (0.146)	0.406*** (0.108)	0.408*** (0.0805)
Abr.	0.817*** (0.0953)	0.841*** (0.0863)	0.773*** (0.0783)	0.995*** (0.105)	0.858*** (0.0909)	0.796*** (0.0787)
May.	1.135*** (0.110)	1.117*** (0.102)	1.045*** (0.0929)	1.356*** (0.120)	1.166*** (0.105)	1.099*** (0.0916)
Jun.	1.144*** (0.110)	1.116*** (0.0990)	1.068*** (0.0876)	1.401*** (0.109)	1.288*** (0.100)	1.171*** (0.0908)

Jul.	1.104*** (0.117)	1.069*** (0.107)	1.026*** (0.0974)	1.139*** (0.116)	1.099*** (0.0997)	1.000*** (0.0912)
Ago.	0.954*** (0.110)	0.880*** (0.0986)	0.844*** (0.0889)	0.828*** (0.121)	0.916*** (0.103)	0.802*** (0.0887)
Sep.	0.536*** (0.108)	0.496*** (0.0950)	0.472*** (0.0876)	0.602*** (0.110)	0.659*** (0.0940)	0.516*** (0.0809)
Oct.	0.262*** (0.0891)	0.264*** (0.0752)	0.235*** (0.0656)	0.456*** (0.0868)	0.367*** (0.0784)	0.306*** (0.0718)
Nov.	0.102 (0.0676)	0.101* (0.0545)	0.0219 (0.0500)	0.354*** (0.0650)	0.270*** (0.0636)	0.205*** (0.0603)
Dic.	0.146** (0.0642)	0.168*** (0.0566)	0.0777 (0.0529)	0.415*** (0.0993)	0.253*** (0.0852)	0.229*** (0.0718)
1998	0.0598 (0.0480)	0.0666 (0.0449)	0.0286 (0.0443)			
1999	0.169*** (0.0575)	0.167*** (0.0531)	0.127** (0.0511)			
2000		0.154** (0.0707)	0.0745 (0.0682)			
2001			0.0753 (0.0884)			
2005						-0.0225 (0.0427)
2006					-0.0760 (0.0548)	-0.0534 (0.0636)
2007				-0.0872 (0.0643)	-0.239*** (0.0906)	-0.146* (0.0886)
2008				0.157 (0.109)	-0.0722 (0.123)	0.0786 (0.104)
2009					0.251** (0.107)	0.379*** (0.0969)
2010						0.356*** (0.130)
Fin semana	0.0142 (0.0224)	0.00870 (0.0203)	0.00806 (0.0178)	0.0901*** (0.0220)	0.0782*** (0.0171)	0.0599*** (0.0137)
Vel. Veinto	-0.318*** (0.0261)	-0.312*** (0.0218)	-0.349*** (0.0225)	-0.392*** (0.0305)	-0.402*** (0.0247)	-0.397*** (0.0201)
Temp.	-0.0212 (0.0188)	-0.0163 (0.0172)	-0.0227 (0.0155)	0.0122 (0.0164)	-0.0105 (0.0140)	-0.00774 (0.0121)
T. P. Rocío	-0.00375 (0.0198)	-0.00465 (0.0171)	-0.00207 (0.0134)	0.0162 (0.0114)	0.00798 (0.00951)	0.00302 (0.00833)
Precip.	-0.119*** (0.0334)	-0.0747*** (0.0252)	-0.0363*** (0.0110)	-0.0440*** (0.0156)	-0.0443*** (0.0114)	-0.0421*** (0.0107)
Vel. Veinto^2	0.0123*** (0.00192)	0.0126*** (0.00159)	0.0155*** (0.00173)	0.0205*** (0.00223)	0.0206*** (0.00195)	0.0201*** (0.00156)
Temp.^2	0.00235***	0.00215***	0.00239***	0.00106*	0.00185***	0.00166***

	(0.000650)	(0.000572)	(0.000506)	(0.000543)	(0.000434)	(0.000375)
T. P. Rocío^2	-0.00144	-0.00120	-0.00133	-0.00195**	-0.00105	-0.000875
	(0.00128)	(0.00110)	(0.000863)	(0.000825)	(0.000692)	(0.000602)
Precip.^2	0.0110***	0.00512***	0.00113***	0.00241***	0.00242***	0.00240***
	(0.00358)	(0.00182)	(0.000334)	(0.000603)	(0.000490)	(0.000496)
Vel. Veinto(-1)	-0.139***	-0.145***	-0.158***	-0.137***	-0.154***	-0.166***
	(0.0257)	(0.0225)	(0.0225)	(0.0337)	(0.0247)	(0.0201)
Temp.(-1)	-0.00746	0.000974	0.0229	-0.0294	-0.0277*	-0.0142
	(0.0193)	(0.0169)	(0.0163)	(0.0185)	(0.0156)	(0.0128)
T. P. Rocío(-1)	0.0141	0.00229	-0.0163	-0.0235*	-0.0201*	-0.0238**
	(0.0175)	(0.0165)	(0.0134)	(0.0130)	(0.0110)	(0.00952)
Precip.(-1)	-0.0347	0.0101	0.0247**	0.00582	-0.0195	-0.00900
	(0.0357)	(0.0200)	(0.0117)	(0.0118)	(0.0126)	(0.0107)
Vel. Veinto(-1)^2	0.00665***	0.00648***	0.00757***	0.00760***	0.00918***	0.00989***
	(0.00201)	(0.00163)	(0.00174)	(0.00279)	(0.00193)	(0.00153)
Temp.(-1)^2	8.45e-05	-0.000294	-0.000890*	0.000520	0.000581	0.000210
	(0.000653)	(0.000549)	(0.000519)	(0.000585)	(0.000492)	(0.000407)
T. P. Rocío(-1)^2	-0.00221*	-0.00158	-0.000337	0.000574	0.000163	0.000323
	(0.00116)	(0.00106)	(0.000844)	(0.000933)	(0.000755)	(0.000656)
Precip.(-1)^2	0.00383	-0.000313	-0.000761**	-0.000124	0.000960*	0.000553
	(0.00369)	(0.00160)	(0.000302)	(0.000495)	(0.000569)	(0.000488)
RV 1998	-0.172***	-0.141***	-0.0749			
	(0.0620)	(0.0535)	(0.0517)			
RV 2007				0.204***	0.102**	0.0377
				(0.0583)	(0.0473)	(0.0399)
Constant	2.960***	3.359***	2.623***	2.763**	0.786	1.907***
	(0.769)	(0.745)	(0.707)	(1.175)	(0.830)	(0.531)
Observations	999	1,365	1,730	1,096	1,826	2,557
R-squared	0.869	0.862	0.860	0.889	0.871	0.867

Resultados son robusto contra heteroscedasticidad y autocorrelación dentro de un cluster de 1 semana. Errores estándar en paréntesis: *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1