



DEPARTAMENTO DE ECONOMÍA

SDT 355

**DEVELANDO ECONOMETRICAMENTE LOS
IMPACTOS DEL TRANSANTIAGO EN LA
CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA DE
SANTIAGO DE CHILE**

Autores: Eugenio Figueroa, Andrés Gómez-
Lobo, Pablo Jorquera y Felipe Labrín

Santiago, Abril de 2012

Develando econométricamente los impactos del Transantiago en la contaminación atmosférica de Santiago de Chile

Eugenio Figueroa, Andrés Gómez-Lobo, Pablo Jorquera y Felipe Labrín

Departamento de Economía

Universidad de Chile

Resumen: Este trabajo estima el impacto que tuvo la reforma integral del sistema de transporte público en Santiago de Chile, denominada *Transantiago*, sobre la contaminación atmosférica en dicha ciudad. Un aporte del trabajo es que muestra cómo, utilizando un modelo econométrico y datos diarios de contaminación, develar técnicamente los impactos ambientales de un programa público que son difíciles de aislar y medir por la existencia de algunas variables confundentes. Se concluye que el Transantiago disminuyó en $3,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el promedio diario de concentraciones de MP10 en la ciudad, provocando un ahorro que se estima en US\$ 200 millones al año en el escenario medio, de los cuales un 12% corresponden al ahorro de gastos en atenciones públicas de salud.

Abstract: This paper estimates the impact of the comprehensive reform of the public transport system in Santiago, Chile, known as *Transantiago*, on air pollution levels in that city. A contribution of the paper is to show,

using an econometric model and daily information on air quality levels, how to technically reveal the environmental impacts of a public program which are difficult to isolate and measure due to several confounding variables. We conclude that *Transantiago* reduced average daily particulate matter (PM 10) concentration levels by 3.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. The health benefits of this reduction are estimated to be around US\$ 200 million per year in our average expected scenario, of which 12% are direct health expenditure savings by the public sector.

Clasificación JEL: H51, L92, Q53, R41, R48

Palabras claves: Contaminación atmosférica, transporte público, salud pública

1. Introducción

El plan de reforma y reestructuración del sistema de transporte público de la ciudad de Santiago, Chile, más conocido como Transantiago, demostró desde sus inicios serios problemas de diseño e implementación. Desde febrero del 2007, cuando el nuevo sistema comenzó su fase definitiva de implementación, ha sido cuestionado por los medios de prensa, los usuarios y los no usuarios.¹ Sin embargo, por propósito y diseño, el Transantiago debía generar una serie de beneficios para la ciudad al reducir algunas externalidades provocadas por el transporte; y hay alguna evidencia que así ha ocurrido. Por ejemplo, los accidentes que involucran a un bus de la locomoción colectiva se redujeron en Santiago desde 6.366 en el año 2005 a 2.937 en el año 2010.² Consistente con esta tendencia, durante este mismo período, el número de lesionados en accidentes que involucraban a un bus disminuyó de 4.409 a 2.248, y el de fallecidos, se redujo de 112 a 83, aunque durante el 2009 había bajado a 58.

Por otro lado, según datos de Carabineros de Chile, el número de delitos con intimidación, violencia o sorpresa en la locomoción colectiva se mantuvo casi constante para los pasajeros entre los años

¹ Mayores detalles de esta reforma, los problemas enfrentados y los ajustes realizados desde el año 2007 se encuentran en Gómez-Lobo (2012).

² Estas cifras provienen de Comisión Nacional de Seguridad de Tránsito (CONASET) que a su vez obtuvo las estadísticas de Carabineros de Chile. Se debe remarcar que antes del Transantiago, y considerando 8.000 buses en operación, cada bus estaba involucrado en un accidente cada 15 meses.

2006 y 2008, pero el de los delitos a conductores bajó de 1.657 en el año 2006 a 147 en el año 2008. Esto tiene relación con la introducción de una tarjeta de pago electrónica que eliminó la necesidad de que los conductores de buses manejen dinero en efectivo.

También es evidente, aunque no hay mediciones para respaldarlo, que el nivel de ruido, o contaminación acústica en la ciudad disminuyó como consecuencia de la reforma. Esto se explicaría principalmente por la renovación de la flota y la nueva estructura de recorridos.

Por otra parte, la renovación de flota asociada al Transantiago —y que reemplazó una fracción importante de los 8.000 buses originales por buses que cumplieran con estándares Euro III o superiores— debería haber disminuido también la contaminación atmosférica en la capital.³ Previo a la reforma, el transporte público era una de las fuentes antropogénicas más importantes de emisiones de material particulado en la capital, representando por sí sola el 22% de estas emisiones (CONAMA, 2006). Así, era de esperar que una modernización significativa de la flota y una racionalización de los recorridos tuvieran como consecuencia una reducción de las emisiones del sector.

³ A diciembre del 2007, el 57,6% de la flota eran buses Euro III o superiores (Sectra 2007); tres años después, el 2010, casi el 100% de la flota ya era Euro III o superior.

Existe evidencia parcial que confirmaría la hipótesis anterior. El Centro Mario Molina Chile (2007) realizó un estudio comparando las emisiones a nivel de calle en dos arterias de importancia de la ciudad (Alameda y Gran Avenida), en el invierno del 2006, antes de la fase definitiva del Transantiago, y en el invierno del 2007, después de iniciada esta fase. Si bien para el período monitoreado hubo un aumento de un 45% de las concentraciones de MP10 a nivel Metropolitano —presumiblemente como consecuencia del aumento en el uso del transporte privado, mayores emisiones de la industria y factores atmosféricos— a nivel de calle se observó una disminución del 30% en el número de partículas ultrafinas (MP 2,5) que corresponden a las emisiones de motores de vehículos diesel, como partículas condensadas y hollín. Además, utilizando modelos de contaminación, dicho estudio concluyó que el aporte del transporte público a la contaminación por óxidos de nitrógeno (NOx) a nivel de calle disminuyó en 50%.

Sin embargo, el estudio anterior no explica la mayor contaminación a nivel de ciudad en el 2007 comparado con el 2006. Otros autores, Gallego, Montero y Salas (2011), estudiaron las mediciones de las estaciones de monitoreo y concluyen que hubo un aumento de 31% en las concentraciones de monóxido de carbono (CO) en las horas punta en Santiago, presumiblemente atribuible al aumento en el uso de automóviles como consecuencia de los problemas asociados a la

reforma. Sin embargo, estos autores no analizan el efecto sobre las concentraciones de material particulado.

La dificultad para identificar el efecto del Transantiago sobre la contaminación en la capital, es que al mismo tiempo de que se introdujo este cambio en el sistema de transporte de la ciudad, ocurrieron otros fenómenos que también afectaron la contaminación. El más relevante es que, a partir del año 2007, se intensificaron los cortes de suministro de gas natural proveniente de Argentina, llegando a ser prácticamente 100% en los años 2007, 2008 y 2009 para el consumo no residencial. Esto generó una sustitución generalizada por petróleo del gas natural que utilizaba el sector industrial, elevando la contribución de este sector en la contaminación de Santiago.

Consistente con lo anterior, es interesante notar que a partir de Septiembre 2009, cuando se pone en funcionamiento la planta de regasificación de gas natural licuado en Quintero —eliminando la dependencia de Argentina en el suministro de este combustible—, la industria vuelve a utilizar gas natural, y es justamente en 2010 cuando se registra el invierno con menores episodios críticos de contaminación desde 1997, según registros de la red MACAM2.⁴

⁴ La MACAM2, operada por el Ministerio de Salud, es una red de estaciones dedicadas a monitorear y medir las concentraciones de los contaminantes atmosféricos en distintos puntos de la ciudad de Santiago, y que se estableció el año 1997, extendiendo y mejorando técnicamente la anterior Red de Monitoreo Automática de Contaminantes Atmosféricos (red MACAM).

Lo anterior podría implicar que, luego de desaparecer los efectos generados por los cortes de gas natural de Argentina, en el año 2010 finalmente se hicieron evidentes los beneficios del Transantiago en cuanto a reducción de emisiones y de niveles de contaminación. Desafortunadamente, esta conclusión es desafiada por al menos dos hechos. En primer lugar, porque en el invierno del 2010 se registraron también condiciones meteorológicas muy favorables en Santiago, lo que favoreció la limpieza del aire. En segundo lugar, porque en el invierno del 2011 se evidenció un aumento en los episodios críticos de contaminación.

En definitiva, para establecer el impacto del Transantiago sobre la contaminación en la capital es necesario esclarecer (*desenredar*) la contribución de distintos factores, incluyendo las condiciones atmosféricas, los efectos de los cortes de gas de Argentina, el crecimiento económico y el propio Transantiago, entre otros factores. Para ello, en este trabajo se utiliza datos diarios de contaminación desde 1997 al 2009, información diaria de condiciones meteorológicas y atmosféricas, datos diarios de los cortes del suministro de gas de Argentina, además de otras variables, para estimar un modelo estadístico que explique los niveles de contaminación de material particulado grueso (MP10) en Santiago.

Los resultados indican que entre los años 2007 y 2010, se evidencia una disminución de $3,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el promedio diario de la concentración de MP10 en la región metropolitana, que no es explicada por condiciones atmosféricas, u otras variables del modelo, y que puede atribuirse al efecto del Transantiago.

Adicionalmente, utilizando funciones dosis-respuesta, se estima los efectos más importantes en la salud de la población derivados de la reducción en las concentraciones de MP10 y se valoriza los cambios en mortalidad y morbilidad ocurridos, según los gastos evitados en salud. Se estima que la reducción en la contaminación equivale a un ahorro de CH\$417.756 millones (o US\$ 790.2 millones⁵) para el trienio 2007-2010, de los cuales CH\$49.385 millones (o US\$ 93,4 millones) corresponderían al ahorro de gastos en atenciones públicas de salud.

Se considera que este estudio y sus resultados pueden ser de amplio interés en la región por al menos tres razones. Primero, aparte de Santiago, existen muchas otras ciudades con problemas de contaminación atmosférica, siendo el D.F. en México un caso emblemático. En la literatura no existen estudios que intenten modelar las concentraciones diarias de contaminantes atmosféricos, y como variables de política o factores exógenos (como las condiciones

⁵ Tipo de cambio corresponde al USD observado promedio 2007-2010 del Banco Central de Chile (US\$1 = CH\$528,7).

atmosféricas) afectan dichas concentraciones. En este sentido, este trabajo es pionero en intentar modelar los determinantes de la contaminación atmosférica, particularmente con datos de alta frecuencia.⁶ Segundo, varias autoridades en América Latina están considerando reformas globales a sus sistemas de transporte público. Un ejemplo es el Sistema Integrado de Transporte Público (SITP) presentado por el Alcalde de Bogotá en Colombia. El presente trabajo entrega antecedentes sobre los posibles impactos que podría tener una reforma integral del transporte público de superficie, al menos en cuanto a su impacto en la contaminación atmosférica. Tercero, es abundante la literatura, de las ciencias naturales como sociales, referida a las dificultades de aislar y medir los efectos de medidas de política u otras variables sobre la contaminación del aire debido a la frecuente presencia de variables confundentes como las señaladas más arriba para el caso del Transantiago (ver, por ejemplo, Song et al. 2012 y Fernando 2012). En este sentido, la metodología que aquí se propone y utiliza representa una contribución respecto al empleo de técnicas econométricas usuales para controlar adecuadamente por las variables confundentes propias del ámbito de la contaminación atmosférica y que pueden ser aplicables en países en desarrollo que implementan

⁶ La mayor parte de la literatura se ha centrado en explicar en forma agregada, usando datos de corte transversal entre ciudades o países, los determinantes de la contaminación para establecer si existe o no una curva de Kuznets ambiental. Ver Gassebner, Lamla y Sturm (2011) para un ejemplo reciente. Otra vertiente común en la literatura es explicar los efectos en salud de la contaminación, o sea, las curvas de dosis-respuesta. Un ejemplo para Santiago es Sánchez, Valdés y Ostro (1998). Pero en la literatura no hemos encontrado publicación alguna que presente un modelo para explicar los niveles de contaminación atmosférica diaria para alguna ciudad.

diferentes medidas de control y/o sufren shocks externos inesperados después de implementarlas.

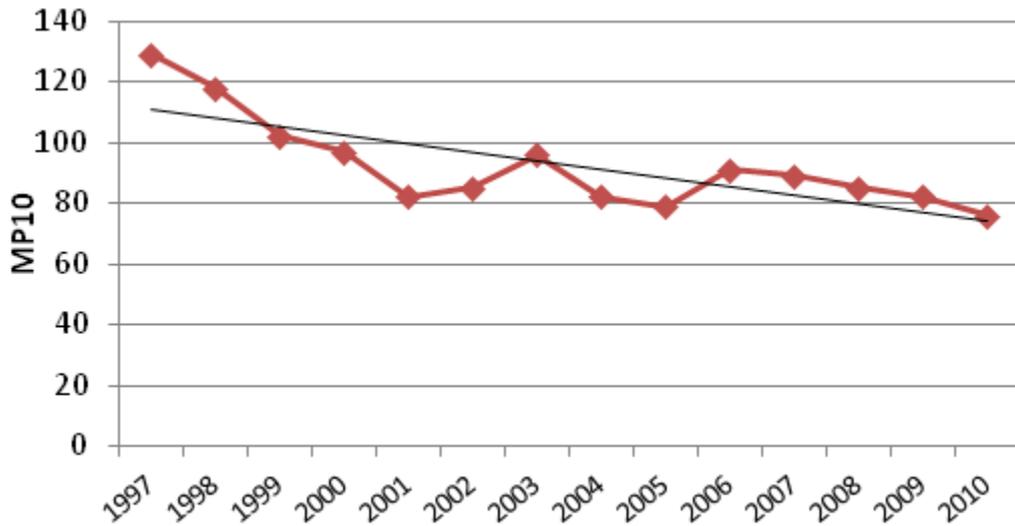
El resto de este estudio está organizado de la siguiente manera: en la siguiente sección se describe el fenómeno de la contaminación atmosférica en Santiago, y se revisa las políticas adoptadas por la autoridad para su control. Luego, se presenta un modelo estadístico de la concentración de material particulado que permite inferir el efecto del plan Transantiago sobre la contaminación, aislándolo de otros factores relevantes. Luego se presenta un análisis de la robustez de las estimaciones. Finalmente, se presenta una valoración económica de la reducción ocurrida en la contaminación.

2. La Contaminación en la ciudad de Santiago

Desde hace décadas, la ciudad de Santiago experimenta un alto grado de contaminación atmosférica, medido por material particulado (MP), principalmente entre los meses de abril y agosto. Cada año se registra una serie de episodios de contaminación denominados “críticos”, que son decretados por la autoridad regional (Intendencia) y que se caracterizan porque la concentración de contaminantes en el aire supera los niveles máximos permitidos por los estándares de calidad

ambiental de la legislación vigente, considerados como peligrosos para la salud humana.⁷

Gráfico 1: Promedio anual de concentración de MP10: 1997-2010



Fuente: elaboración propia en base a datos de la Secretaría Regional Ministerial de Salud de la Región Metropolitana.

El **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** presenta la evolución del promedio de concentración anual de MP10 entre los años 1997 y 2010.⁸ Se observa que dicho promedio muestra una tendencia decreciente, aunque moderada, indicativa de que la calidad del aire ha mejorado persistentemente en los últimos 15 años, con una mejora sustancial el año 2010. Cabe destacar que esto se dio en un contexto

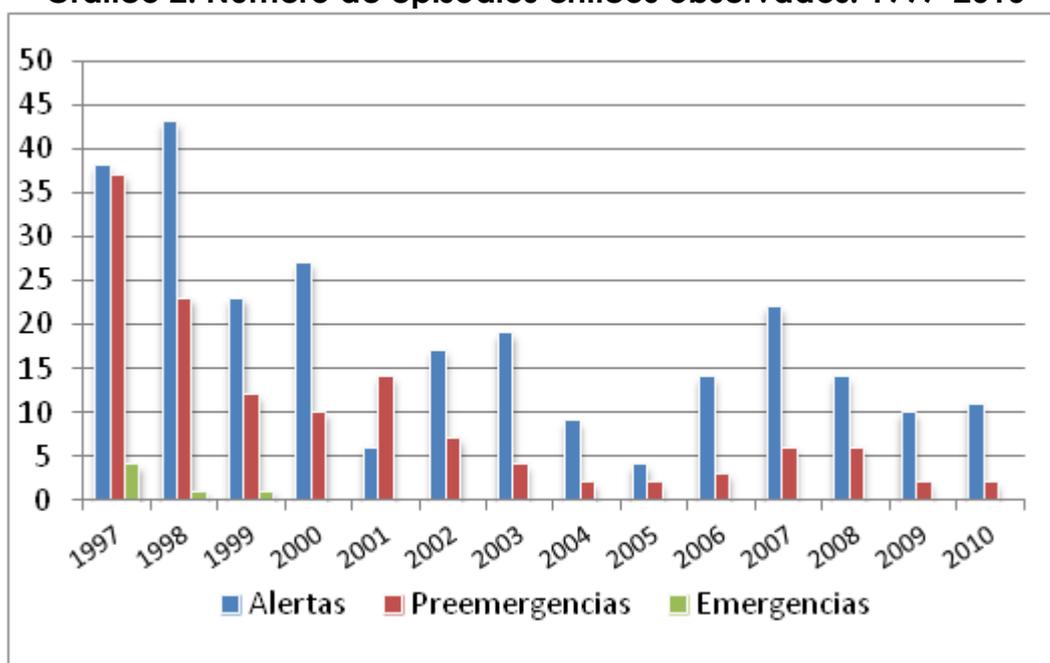
⁷ Los episodios críticos son clasificados como Alertas, Preemergencias o Emergencias según el nivel de las concentraciones esperadas.

⁸ Calculado como el promedio simple de las concentraciones horarias reportadas por la red MACAM2, para los meses críticos, entre abril y agosto; desde el año 1997 hasta el 2010; para 7 estaciones, que presentan series de datos completas para dicho periodo.

de crecimiento económico, por lo que las concentraciones por unidad de producto tuvieron un descenso mayor.⁹

El **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra el número de episodios críticos decretados por la autoridad para la ciudad de Santiago, desglosados según su gravedad.¹⁰ Se observa una reducción del número de episodios decretados, particularmente pre-emergencias y emergencias, lo que nuevamente es indicativo de las mejoras en los niveles de concentración de contaminantes.

Gráfico 2: Número de episodios críticos observados: 1997-2010



Fuente: elaboración propia en base a datos de Conama RM.

⁹ El crecimiento del PIB de la Región Metropolitana fue de 43,8% en el período 1997-2009 (calculado a partir de las series no empalmadas de datos de PIB real para los períodos 1997-2003 (base 1996) y 2003-2009 (base 2003) del Banco Central). En el mismo período el crecimiento del PIB nacional fue de 46,7%.

¹⁰ Cuando el Intendente decreta un episodio crítico, determina la gravedad del mismo (alerta, preemergencia o emergencia) de acuerdo al nivel del Índice de Calidad del Aire referido a Partículas (ICAP), y ella define las medidas medioambientales que deben implementarse para enfrentar el episodio y proteger a la población, las que son definidas en el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA). La gravedad del episodio es mayor y las medidas que ella gatilla son más estrictas mientras mayor sea el nivel del ICAP registrado.

La tendencia decreciente en la contaminación atmosférica registrada en Santiago tiene muchas y variadas causas. Primero, en el año 1998, mediante DS 16 de MINSEGPRES, se aprueba el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana (PPDA) que establece medidas para la descontaminación, fijando dos ejes de acción principales: *Sector transportes y combustibles*, y *Sector Industrial, comercio y residencial* (ver Merino et al. 2005).

El descenso claro observado a partir del año 2000 se explicaría principalmente por la incorporación del gas natural al sector industrial, que reemplaza a las antiguas fuentes energéticas, como el petróleo o la leña, que son más contaminantes (CONAMA Región Metropolitana, 2009). La introducción del gas natural en la década del 2000 tuvo un efecto relevante sobre la emisión de gases proveniente de ese sector. Sin embargo, en el año 2004 comienzan a constatarse cortes del suministro de gas natural proveniente de Argentina, pudiendo cambiar la tendencia a la baja de las emisiones industriales observada hasta el año 2005. Estos cortes se hicieron más severos cada año, restringiendo la oferta de gas disponible para el sector industrial, hasta que en Septiembre del 2009 se inauguró una planta de regasificación de gas natural, que permitió cubrir la demanda por este combustible mediante gas natural licuado proveniente de otros países.¹¹ Es razonable suponer

¹¹ Los cortes del gas natural proveniente de Argentina sólo afectó el consumo industrial, ya que las autoridades Argentinas permitieron envíos para cubrir la demanda residencial.

que durante el período 2004 al 2009, y en forma creciente, las emisiones del sector industrial aumentaron como consecuencia del uso de combustibles más contaminantes, asunto que se explora más adelante en el análisis empírico.

En relación al transporte, se destaca la adopción de normas de emisión más estrictas durante el período, incluyendo medidas para la reducción de la emisión de MP10, y la introducción gradual en Santiago de un combustible diesel (denominado 'Diesel Ciudad') más limpio, llegando éste a tener sólo 50 partes por millón de azufre hacia el año 2004. Además, durante la década se duplicó la extensión del Metro de Santiago, lo cual al ser un medio subterráneo y eléctrico ayudaba a descongestionar y descontaminar la ciudad.

A pesar de estas medidas la Comisión Nacional del Medio Ambiente de la Región Metropolitana (CONAMA Región Metropolitana, 2006) estimó que, en el año 2005, el sector transporte aportaba el 49% de las emisiones de origen antropogénico responsables de la concentración atmosférica de MP10, mientras que el transporte público, específicamente, aportaba el 22% y el transporte liviano (autos particulares mayoritariamente) representaba un aporte relativamente bajo, de 9%. Según el mismo estudio, la contribución del sector industrial a la contaminación total en la Región Metropolitana superaba el 30%.

Por lo tanto, a mediados de la década pasada el transporte público representaba una fracción importante de las emisiones de material particulado en la ciudad. En este contexto, en febrero del año 2007 parte la fase final de una reforma del sistema de transporte público, denominado Transantiago. Esta reforma contemplaba muchas medidas, incluyendo la introducción de un sistema de pago electrónico, la integración tarifaria entre los distintos servicios de buses y entre los buses y el metro, el reordenamiento completo de las rutas, entre muchas otras medidas.¹²

En cuanto a la contaminación atmosférica, lo más relevante del Transantiago fue la reducción —en el diseño original— del parque total de buses de cerca de 8.000 a 4.700 aproximadamente. Además se contemplaba la renovación de parte importante de la flota de buses, que ahora debía cumplir las normas de emisión Euro III y IV.¹³ Si bien los problemas iniciales de la reforma obligaron a subir la flota hasta 6.100 buses aproximadamente, hacia el 2010 casi la totalidad de ésta la componían buses nuevos con estándar Euro III o IV.

¹² Ver Gómez-Lobo (2012) para una descripción más detallada de esta reforma, su diseño original y los cambios introducidos luego de su compleja puesta en marcha.

¹³ Las normas de emisión EURO III y IV, regulan la emisión de contaminantes para vehículos pesados y fijan los estándares de emisión de vehículos nuevos en la Unión Europea. Constituyen actualizaciones de la directiva 70/220/CCE de la Comisión Europea. La reforma también contemplaba la instalación de filtros para los buses más antiguos de la flota, pero esto nunca se llegó a materializar.

La reforma también contemplaba la construcción de vías segregadas para el transporte público. Se consideraba 15 proyectos de corredores segregados, con un total de 225 km de vías, pero en un horizonte de casi 20 años.¹⁴ Hacia finales del 2009 se habían completado casi 90 kilómetros de los 225 previstos en el plan. Al permitir aumentar la velocidad promedio de los buses, estas vías podrían ayudar a disminuir las emisiones atribuibles al transporte público.¹⁵

Por último, la reforma consideraba una reducción de los kilómetros totales recorridos por el sistema de buses. Esto se debía en parte al aumento del uso del metro como consecuencia de la integración tarifaria y también como consecuencia de pasar de un sistema de rutas de punta a punta —que generaba una sobre-posición de recorridos en las arterias más importantes de la ciudad— por un sistema de tipo troncal-alimentador.

A pesar de los tropiezos operativos iniciales, la casi completa renovación de buses al 2010, más la racionalización de los recorridos del sistema, y el uso más intensivo del Metro, hacen pensar que la implementación del Transantiago pudo haber generado un descenso en la contaminación del aire de la capital. Sin embargo, como se analizó antes, existen otros

¹⁴ A octubre de 2006 se contaba con sólo 16 km construidos.

¹⁵ Otras medidas de gestión de tránsito, como pistas sólo buses, y vías exclusivas también podrían haber contribuido a este efecto. Las primeras son vías donde existe una separación parcial y de bajo estándar entre el tráfico privado y el transporte público, de las cuales hay cerca de 100 kilómetros. La segunda son vías donde sólo puede transitar el transporte público durante las horas punta de la semana.

fenómenos de política —además de factores climatológicos— que afectaron al mismo tiempo la contaminación. Por lo tanto, en la siguiente sección se especifica un modelo estadístico para explicar la evolución de la contaminación atmosférica en Santiago durante el período de interés y estimar el eventual efecto del Transantiago sobre ella, una vez eliminados los efectos contemporáneos sobre la contaminación de las variables confundentes.

3. Especificación del modelo y datos empleados

Para la modelación, la variable de interés a explicar es el nivel de contaminación atmosférica de la ciudad de Santiago. Existiendo diversas formas de contaminación atmosférica, el presente trabajo se enfoca específicamente en la concentración de MP10. Esto por dos motivos: por una parte, las concentraciones de MP10 han sido las que mayor preocupación han generado entre las autoridades y, en concordancia con lo anterior, las concentraciones de MP10 han sido utilizadas como indicador de la calidad del aire y como variable central para el diseño y seguimiento de las políticas públicas por parte de los organismos competentes. Por otra parte, existe una disponibilidad amplia de datos con la antigüedad suficiente para llevar a cabo un estudio estadístico.

En el presente estudio se utiliza la información oficial disponible sobre concentraciones diarias de MP10, durante el periodo 1997-2010, en los meses de abril a agosto (ambos inclusive) de cada año. Esto último debido a que la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), a través del PPDA, propone la aplicación de *medidas permanentes* para el control de las emisiones de contaminantes entre el 1 de abril y el 31 de agosto de cada año, periodo crítico para las condiciones de contaminación de la ciudad debido a las condiciones meteorológicas imperantes durante el período otoño-invierno en la cuenca de Santiago.¹⁶

Se especifica el siguiente modelo general para explicar las concentraciones diarias de MP10:

$$\begin{aligned}
 MP10_{it} = & \alpha + \beta_1 \cdot MP10_{it-1} + \beta_2 \cdot Misumi_t + \beta_3 \cdot IMACEC_t + \beta_4 \cdot Lluvias_t \\
 & + \beta_5 \cdot Corte\ gas_t + \beta_6 \cdot Azufre_t + \beta_7 \cdot D^{alerta}_{t-1} \\
 & + \beta_8 \cdot D^{pre-emergencia}_{t-1} + \beta_9 \cdot D^{emergencia}_{t-1} + \beta_{10} \cdot t + \gamma \cdot D_{07} \\
 & + \varepsilon_{día} + \varepsilon_{estación} + \vartheta_{it}
 \end{aligned}$$

La concentración diaria de MP10 es la variable dependiente del modelo. El subíndice i identifica la estación de monitoreo de calidad ambiental de la red, y t corresponde a la fecha de la observación (días

¹⁶ En estos meses se producen inversiones térmicas que reducen la ventilación de la cuenca de Santiago provocando el aumento de las concentraciones de contaminantes (Merino 2006).

entre los meses de abril y agosto de cada año). La información proviene de la Red de Monitorio Automática de Contaminantes Atmosféricos (red MACAM2) compuesta de ocho estaciones distribuidas en las distintas comunas del Gran Santiago (ver Figura 1).¹⁷ En el presente estudio se utiliza los datos para las siete estaciones que presentan información para todos los años del período (1997-2010), por lo que se excluyen las mediciones de la estación de la comuna de Providencia. Para transformar los datos horarios a diarios, se utiliza el promedio simple de 24h diarias. Esta metodología es empleada en diversas investigaciones tanto internacionales como nacionales.¹⁸

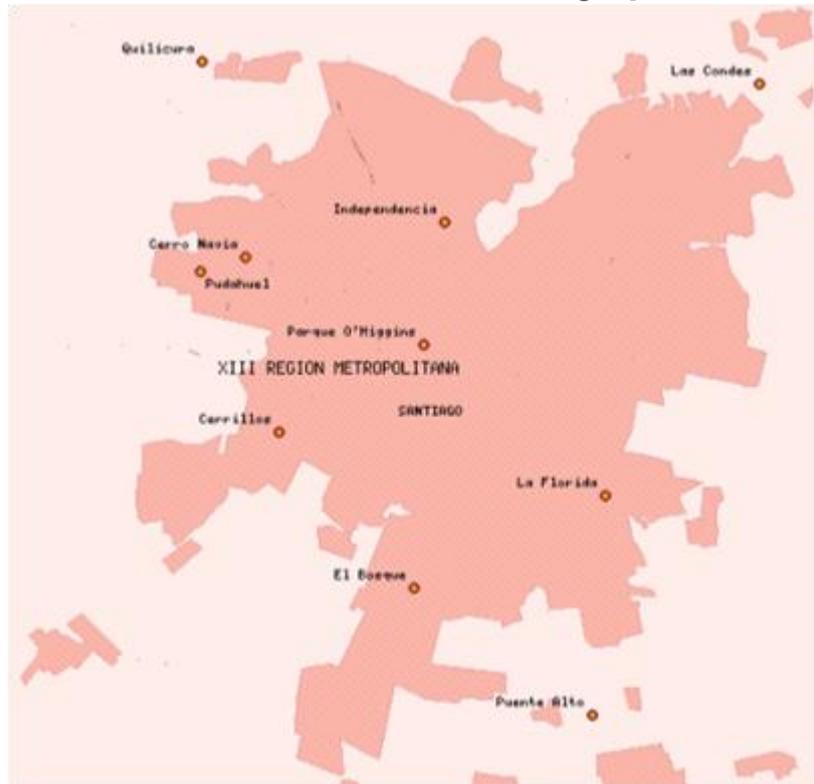
El modelo incorpora el rezago de la variable dependiente como variable explicativa y en algunas especificaciones presentadas más abajo se prueba hasta con tres rezagos de esta variable.¹⁹

¹⁷ Las ocho estaciones se ubican en las comunas de Independencia, Las Condes, Santiago, Pudahuel, El Bosque, La Florida, Cerrillos, y Providencia. Además de estas estaciones, ha habido algunas estaciones experimentales con mediciones ocasionales, como La Dehesa; otras se han agregado, como Cero Navia en el 2009; y existen otras estaciones complementarias a la red MACAM2, como las de las comunas de Puente Alto, Talagante y Quilicura.

¹⁸ Ver por ejemplo Atal (2009). En una versión preliminar de este trabajo se estimó también un modelo utilizando las concentraciones a medio día (12 horas) de cada día con resultados muy similares a los reportados más abajo.

¹⁹ Cabe destacar que el modelo especificado corresponde a un modelo de panel dinámico con efectos fijos cuando se incluyen rezagos de la variable dependiente al lado derecho de la ecuación. Es bien conocido que una estimación tradicional de panel con efectos fijos entregará coeficientes sesgado si se incluye la variable dependiente rezagada como variable explicativa. En ese caso, se debe utilizar estimadores como los de Arellano y Bond (1991) u otros similares. Sin embargo, el problema mencionado ocurre en paneles "cortos", cuando t es relativamente pequeño. A medida que t crece, el sesgo disminuye. Estudios de Monte Carlo como los de Judson y Owen (1999) sugieren que cuando $t > 30$ ya no hay un sesgo importante de estimar el modelo mediante técnicas tradicionales de panel. En esta aplicación t supera ampliamente este límite, por lo que un eventual sesgo no es relevante en este caso.

Figura 1: Ubicación de las estaciones de monitoreo y medición de la calidad del aire en la ciudad de Santiago (Red MACAM2)



Fuente: SINIA de CONAMA

La variable *Misumi* es un índice de estabilidad atmosférica vertical desarrollado a fines de los años noventa por el investigador japonés Dr. Yukio Misumi junto con investigadores del Centro Nacional del Medioambiente (CENMA). Este índice mide la intensidad de la inversión térmica en la cuenca de Santiago, lo que constituye un factor crucial en la concentración de la contaminación atmosférica y se basa en la diferencia entre las temperaturas registradas en las estaciones meteorológicas operadas por el CENMA ubicadas en La Platina (a 650 msnm) y el Cerro Lo Prado (aproximadamente a 1.200 msnm).²⁰ El

²⁰ La importancia de la inversión térmica en la cuenca de Santiago sobre los niveles de contaminación atmosférica de la ciudad es enfatizada en Merino (2006) y Garreaud & Rutlant (2006).

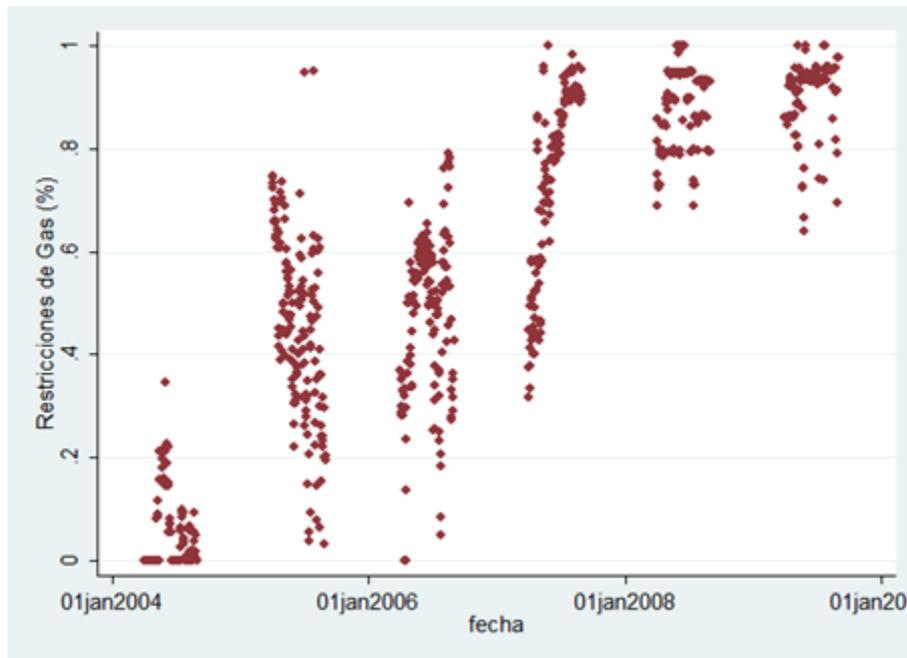
índice *Misumi* se construye de forma horaria, por lo que en el presente trabajo se transformó a un índice diario tomando el promedio simple de las 24h diarias.

Es esperable que mayores niveles de actividad económica generen mayores niveles de emisión de contaminantes y, por ende, todo lo demás constante, de concentración de los contaminantes (ver CONAMA (2009)). Por lo tanto, en el modelo propuesto se incluye un indicador de actividad económica en la forma del Índice Mensual de Actividad Económica (*IMACEC*) medido por el Banco Central de Chile.²¹

Las lluvias son un importante factor determinante de la concentración de MP10, dado que ellas disipan su presencia en la tropósfera. La variable de Lluvias se construye utilizando los datos reportados por el CENMA, que opera la estación de monitoreo meteorológica de La Platina. Dado que esta estación no reportaba datos para los años 1999 y 2003, éstos fueron complementados por los datos de la Dirección Meteorológica de Chile. Esta variable está construida como una variable *discreta* que reporta la ocurrencia de un fenómeno de precipitación, sin tomar en cuenta la cantidad de horas o milímetros de agua caída.

²¹ Los resultados no difieren si en vez de incluir este índice en forma mensual o se interpola diariamente entre los días de cada mes.

Gráfico 3: Restricciones diarias de envíos de gas a la zona central de Chile: 2004-2009



Fuente: Elaboración propia, en base a datos de la CNE.

La variable Corte gas mide el porcentaje diario de restricción de envíos de gas natural desde Argentina para la zona central de Chile a partir del año 2004. Esta variable es relevante por cuanto habría implicado el uso de energías más contaminantes, como el petróleo, por parte del sector industrial (el sector residencial no fue afectado por los cortes). Los datos sobre las restricciones de provisión de gas son reportados, como porcentaje del total de la demanda interna, por la Comisión Nacional de Energía (CNE) y se extienden desde mayo del año 2004 hasta agosto del año 2009, fecha en la que comenzó a operar la planta de recepción, almacenamiento y regasificación de Gas Natural Licuado (GNL) de Quinteros. Los datos que se presentan en el Gráfico 3 muestran que en el año de entrada en vigencia del Transantiago, las restricciones de gas alcanzaron los niveles más altos en su historia previa, y

continuaron creciendo hasta la entrada en operación de la planta de Quinteros.

La regulación sobre la composición de los combustibles resulta relevante puesto que éstos son precursores de material particulado, afectando los niveles de contaminación, principalmente de carácter secundario. Desde comienzos de la década pasada la regulación ha reducido el contenido de azufre permitido en los combustibles, proceso que culminó con la regulación actualmente vigente, promulgada en enero de 2004, que redujo significativamente la cantidad de azufre permitida en los combustibles expendidos. Por ello, el modelo incluye la variable explicativa *Azufre*, que corresponde a la máxima concentración de azufre permitida en los combustibles diesel para los distintos periodos, y cuyos valores se detallan en la Tabla 1.

**Tabla 1: Concentración de azufre permitida en combustibles diesel:
1997-2010**

Año	Nivel de Azufre
Hasta 2000	3000 ppm
Hasta Abril de 2001	1000 ppm
Hasta 01 julio de 2004	300 ppm
Desde 02 julio de 2004	50 ppm

Fuente: PPDA RM y Memorias Anuales ENAP

Es esperable que el nivel de concentraciones atmosféricas medido en un día cualquiera esté influenciado por el hecho de si el día anterior se decretó algún episodio crítico: alerta, preemergencia o emergencia.

Incluir una variable que capte esta eventual relación resulta relevante ya que al decretarse un episodio crítico la autoridad impone una serie de medidas para controlar las emisiones de fuentes fijas y móviles, lo que podría afectar la concentración de MP10 del día siguiente. Por ello, en el modelo se incluye una variable discreta que toma el valor de uno (cero en caso contrario) si en el día anterior ($t-1$) se decretó uno de los tipos de episodio crítico (alerta, preemergencia o emergencia ambiental). En la aplicación empírica del modelo, esto permite determinar no sólo si existe o no el efecto esperable, sino que además, la importancia relativa del efecto de cada uno de los tres tipos de episodios.

El modelo también incluye una variable de tendencia diaria para captar los efectos del mejoramiento gradual del parque automotriz, los cambios tecnológicos, las mejoras en la productividad de los insumos, ciertos cambios en el comportamiento de los individuos, y otros fenómenos no capturados por el resto de las variables incluidas en el modelo.

El modelo incluye la variable explicativa $D07$ que representa la motivación principal de este trabajo, pues identifica el impacto esperable sobre las concentraciones diarias de MP10 en la ciudad de Santiago que tuvo la puesta en marcha del plan Transantiago. Para ello se utiliza una variable *discreta* que toma el valor de uno a partir del año

2007 y que permite capturar si existe o no un cambio en el comportamiento de las concentraciones de MP10 a partir del año 2007 en que se puso en marcha el Transantiago. En la medida que no hubo cambios contemporáneos en otras variables o políticas implementadas durante el período de vigencia del Transantiago, esta variable debería capturar el efecto del plan Transantiago sobre las concentraciones promedio de MP10. Dado que se utiliza una variable discreta para identificar el efecto del Transantiago sobre la contaminación, es necesario examinar la robustez de los resultados mediante varias aproximaciones que se discuten más adelante.

Finalmente, el modelo especifica dos tipos de efectos fijos. Primero se incluye un efecto por día de la semana, $\varepsilon_{día}$, para reflejar el hecho de que hay días con menor actividad (domingo o feriado, por ejemplo) que otros (miércoles, por ejemplo). Segundo, se incluye un efecto fijo por estación de monitoreo, $\varepsilon_{estación}$, para controlar por diferencias sistemáticas en las concentraciones de las distintas zonas de la ciudad. El término θ_{it} es un término de error que se asume independiente e idénticamente distribuido.

Por último, resulta relevante destacar que, por no estar disponibles, no se incluyó en el modelo datos referidos a la intensidad del uso del parque automotriz en Santiago. Sólo están disponibles datos anuales de inscripción de vehículos, de forma que no resultan apropiados para

emplear un modelo de carácter diario como el aquí propuesto. Así mismo estos datos tampoco capturan el uso de los vehículos. Por otra parte, la Unidad Operativa de Control de Tránsito (UOCT) reporta datos de flujo vehicular diario, que sólo están disponibles a partir de 2004, por lo que tampoco resultan apropiados de emplear debido al período de tiempo que contempla la estimación empírica del modelo aquí propuesto. La falta de información adecuada sobre la intensidad de empleo del parque vehicular puede no ser muy relevante si es correcto el juicio de ciertos expertos que señalan que el efecto del transporte privado sobre las concentraciones de MP10 es bajo relativo a otras fuentes.

4. Resultados

Los resultados obtenidos de la estimación del modelo se presentan en la Tabla 2: **Resultados de la estimación del modelo de concentraciones diarias de MP10 en la ciudad de Santiago, 1997-2010**

.²² La primera columna muestra los resultados al no incluir rezagos de la variable dependiente, mientras que las otras tres columnas muestran los resultados de incluir uno, dos y tres rezagos en la estimación.

²² Todos los modelos son estimados mediante MCO. Al incluir variables discretas por estación de monitoreo y día, esto equivale a estimar un panel con efectos fijos. Cuando se incluye la variable dependiente rezagada, el modelo corresponde a un panel dinámico y MCO entrega estimadores sesgados en paneles cortos. Sin embargo, este sesgo disminuye a medida que aumenta t y estudios de Monte Carlo como los de Judson y Owen (1999) sugieren que cuando $t > 30$ ya no hay un sesgo importante de estimar el modelo mediante técnicas tradicionales de panel. En esta aplicación t

Tabla 2: Resultados de la estimación del modelo de concentraciones diarias de MP10 en la ciudad de Santiago, 1997-2010

VARIABLES	(1) Modelo sin rezago	(2) 1 rezago	(3) 2 rezagos	(4) 3 rezagos
1 rezago MP10		0,33** (0,008)	0,36** (0,009)	0,36** (0,010)
2 rezagos MP10			-0,06** (0,009)	-0,08** (0,010)
3 rezagos MP10				0,04** (0,008)
Misumi	6,47** (0,119)	5,21** (0,115)	5,16** (0,115)	5,22** (0,115)
Misumi^2	-0,10** (0,004)	-0,08** (0,004)	-0,08** (0,004)	-0,09** (0,004)
IMACEC	1,60** (0,067)	1,05** (0,063)	1,08** (0,063)	1,07** (0,064)
Gas	8,28** (1,680)	11,54** (1,687)	11,21** (1,713)	11,15** (1,731)
Lluvia	-10,91** (0,685)	-10,31** (0,640)	-10,26** (0,642)	-10,24** (0,642)
Tendencia	-0,03** (0,001)	-0,02** (0,001)	-0,02** (0,001)	-0,02** (0,001)
Alerta _{t-1}	6,47** (0,836)	-2,62** (0,837)	-0,99 (0,871)	-1,43 (0,878)
Preemergencia _{t-1}		-4,63** (1,527)	-2,07 (1,577)	-3,24* (1,570)
Azufre	0,00** (0,000)	0,00 (0,000)	0,00 (0,000)	0,00 (0,000)
D07	-3,38** (1,137)	-2,61** (1,052)	-2,95** (1,062)	-3,06** (1,072)
Constante	295,92** (11,551)	234,38** (11,387)	242,02** (11,421)	235,88** (11,508)
Observaciones	13.421	13.247	13.148	13.049
R ²	0,59	0,65	0,65	0,66
R ² Ajustado	0,59	0,65	0,65	0,65
Test F	814,26	943,14	904,25	870,99

Fuente: Elaboración propia. *Nota:* Errores estándar entre paréntesis ** p<0.01, * p<0.05. La matriz de varianza-covarianza fue estimada mediante la opción robusta. No se reportan los resultados de las variables discretas por estación y días de la semana.

Estimaciones preliminares indicaron que la variable de episodios de emergencia en el día previo no resultó significativa en ninguna de las regresiones y se eliminó de los modelos presentados en la Tabla 2. Esto

supera ampliamente este límite, por lo que un eventual sesgo no es relevante en este caso. En todos los modelos se utilizó una estimación robusta de la matriz de varianza-covarianza. También se probó una estimación mediante *bootstrap* de los errores estándar con resultados muy parecidos a los reportados.

se puede explicar por la falta de información estadística, debido a que estos episodios son poco frecuentes, y han ido disminuyendo durante la última década. La variable rezagada de lluvias tampoco resultó significativa estadísticamente y se omitió. Lo anterior indica que el efecto de las lluvias no se prolonga en el tiempo, o bien, la naturaleza de la variable no permite hacer este tipo de inferencias, dado que es discreta e indica si hubo precipitaciones, y no toma en cuenta la intensidad de las mismas o su duración.

De la Tabla 2 se observa que en general todas las variables tienen el signo esperado, particularmente en los modelos con la variable dependiente rezagada. Los modelos de las columnas (2) a (4) indican que los rezagos son importantes para explicar la contaminación, pero cuantitativamente la contaminación del día anterior es la que tiene mayor importancia.²³

Los resultados para el índice *Misumi* confirman la relación positiva entre las condiciones de la inversión térmica de la cuenca y los niveles de concentración de MP10, lo que ratifica el condicionamiento climático de las condiciones de contaminación atmosférica en la cuenca de

²³ Esto se debe en gran medida a que la concentración es un promedio simple de los datos horarios, por lo que las concentraciones de la noche anterior están correlacionadas con las primeras horas del día siguiente. Si se estima el modelo con las concentraciones a medio día, en lugar del promedio diario, los rezagos ya no son significativos.

Santiago. Esta relación es decreciente, como se observa del signo negativo relacionado con la variable *Misumi* al cuadrado.²⁴

La actividad económica también tiene un impacto positivo sobre las concentraciones. La variable IMACEC es mensual, pero los resultados reportados no se alteran significativamente si se utiliza esta variable interpolada diariamente.

Tal como se esperaba, se observa que restricciones mayores en los envíos de gas desde Argentina impactan de forma directa en la contaminación ambiental, donde un 100% de restricción al suministro de gas en un día implica un aumento de alrededor de más de 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en las concentraciones en el corto plazo y más de 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el largo plazo según los modelos con rezagos.²⁵ Esto se explicaría por una reconversión del sector industrial hacia fuentes energéticas más contaminantes para hacer frente a los cortes en los suministros.²⁶

Por otra parte, se observa un efecto negativo de las lluvias sobre las concentraciones de MP10 en un mismo día, lo que era de esperarse debido al efecto disipador de las precipitaciones. Como se señaló más

²⁴ Estimar el modelo sin incluir la variable *Misumi* al cuadrado no altera los resultados presentados aquí.

²⁵ Para obtener el impacto de largo plazo, se debe dividir el parámetro asociado a los cortes de gas por uno menos la suma de los coeficientes de las variables rezagadas.

²⁶ La mayor parte de las calderas y equipos del sector industrial son duales, en el sentido de que permiten el uso de varios combustibles, esta conversión se puede hacer en forma diaria.

arriba, este efecto disipador no se extiende temporalmente más allá del día en que ocurre la precipitación.

Se observa también una tendencia en el tiempo a la baja de los niveles de contaminación, lo que podría estar relacionado con una mejora tecnológica constante de la composición del parque automotriz en materia medioambiental (mayor eficiencia, por ejemplo) u otros cambios tecnológicos graduales.

Es particularmente interesante observar el resultado de la variable discreta para las alertas y pre-emergencias el día anterior. Los resultados de la columna (2) indican que el decretar un episodio de alerta ambiental está asociado a mayores concentraciones de MP10 para el día siguiente. Sin embargo, al incluir la variable dependiente rezagada este efecto se torna negativo, como se esperaba. Además, el impacto negativo es menor que en el caso de las pre-emergencias, lo cual es razonable si se considera que estos últimos episodios gatillan medidas regulatorias más agresivas, como el cierre de fuentes fijas de emisión y la imposición de restricción vehicular a los autos con convertidor catalítico.

Con respecto al azufre, se observa que existe una relación positiva entre los contenidos del mismo en los combustibles expendidos y las concentraciones evidenciadas de MP10 en la ciudad. Sin embargo, este efecto no es estadísticamente significativo en los modelos con

rezagos de la variable dependiente. En parte esto último podría deberse a que la variable de tendencia podría estar capturando parte del efecto de la disminución del contenido de azufre en los combustibles, ya que como se muestra en la Tabla 1, la reducción de este contaminante fue gradual durante la década pasada.

Aunque no se presentan en la tabla, las variables de efectos fijos por estación de monitoreo indican que las concentraciones de MP10 recogidas en la estación de Las Condes son considerablemente menores a las otras estaciones. Esto puede deberse a que el uso del suelo en dicha comuna y sus aledañas, es principalmente residencial (y no industrial) contando, además, con más áreas verdes que otras comunas, y por otro lado, a que las mejores condiciones económicas de sus habitantes permiten un uso de mejores y más modernos vehículos y equipos de calefacción. Por otra parte, las estaciones de La Florida y Pudahuel, corresponden a las dos estaciones con un mayor registro de concentraciones de MP10, debido a sus características geográficas y de ventilación.

Tampoco se reportan los efectos fijos del día de la semana. Pero los resultados para estas variables son consistentes con lo esperado. El día viernes corresponde al de mayor nivel de concentraciones en la semana. Tal situación se entiende debido a un aumento de los viajes realizados hacia afuera de la ciudad, y un efecto acumulativo de la

actividad de la semana laboral. Se destaca también que en los días domingo hay una menor concentración, debido a una menor actividad generadora de contaminantes, y este efecto persiste hasta el día lunes. Finalmente, se observa que, consistente con la hipótesis central de este estudio, las concentraciones de MP10 han disminuido desde el año 2007 en adelante. En el modelo sin rezago esta disminución es de $-3,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en los modelos con rezago va desde un $-2,61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (modelo columna (2)) a $-3,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (modelo columna (4)) en el corto plazo, lo que corresponde a una disminución entre $-3,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $-4,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el largo plazo. Por lo tanto, existe evidencia de una disminución en la contaminación que podría atribuirse a la implementación del plan de transporte urbano Transantiago.

5. Robustez de la estimación²⁷

La inferencia respecto al impacto del Transantiago se hace utilizando una variable discreta para el período 2007 a 2010. Esta inferencia podría estar errada si es que esta variable está captando no linealidades o efectos de tendencia no controlados en el modelo. Para examinar la robustez de los resultados se realizaron dos ejercicios adicionales. Primero, se estimó el modelo incorporando una tendencia cuadrática para analizar si existen no linealidades en la especificación. Segundo, se

²⁷ Agradecemos a Eduardo Fajnzylber por proponer varios de los test de robustez que se presentan aquí.

realizó un test de falsificación, incorporando una variable dicotómica en los años 2005 y 2006, para luego realizar la misma regresión especificada arriba pero sólo hasta el año 2006 (previo a la implementación del Transantiago). Si esta variable resulta ser estadísticamente significativa y de signo negativo, podría ser entonces que la variable *D07* en los modelos de más arriba, está capturando alguna no-linealidad o variables omitidas que nada tienen que ver con el Transantiago.

Tabla 3: Análisis de robustez

VARIABLES	(1) Modelo tendencia cuadrática	(2) Modelo datos hasta 2006
Tiempo	-0,03* (0,012)	-0,02** (0,001)
tiempo2	0,00 (0,000)	-
d07	-3,52** (1,292)	-
d05	-	1,51 (1,618)
Observaciones	13.049	9.936
R-squared	0,66	0,66
Adj. R-squared	0,65	0,66
Ftest	840,09	680,79

Fuente: Elaboración propia. *Nota:* Errores estándar entre paréntesis. ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$. No se presentan los resultados para los otros coeficientes del modelo.

Los resultados para las variables de interés se presentan en la Tabla 3. Se puede ver que al incluir una tendencia al cuadrado, ésta variable no resulta estadísticamente significativa y además no cambia el signo ni la significancia de la variable *D07*. Por otro lado, al acortar la muestra hasta el año 2006 e incluir una variable discreta para el año 2005 y 2006,

esta última variable no es estadísticamente significativa. Por lo tanto, ambos resultados sugieren que los resultados expuestos en la sección anterior son robustos y que la variable *D07* está efectivamente controlando por algo que ocurrió a partir de esa fecha.

6. Valoración Económica de las Disminuciones en las Concentraciones de MP10

En esta sección se valoran económicamente los efectos medioambientales que según los resultados de la sección anterior se pueden atribuir al Transantiago. Estos efectos se refieren a la disminución que se observa de las concentraciones de MP10 a partir del año 2007 cuando el Transantiago entró en funcionamiento. Se debe dejar en claro que cualquier valoración tenderá a subestimar el verdadero valor de tales efectos, ya que las concentraciones de MP10 tienen múltiples repercusiones en el bienestar de los individuos expuestos a dichas concentraciones. El presente estudio sólo se centra en la dimensión de salud de la reducción de las concentraciones diarias de MP10.

Para estimar la reducción en las concentraciones de MP10 a que está expuesta la población de Santiago se utilizan los resultados del modelo de la columna (2) de la Tabla 2, por ser los más conservadores entre los modelos con rezagos. Dicho modelo indica que en el largo plazo el

efecto en las concentraciones MP10 es de $-3,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se consideró el mismo efecto para toda la ciudad de Santiago.

Se calculan los efectos de la reducción de la contaminación sobre la salud humana, específicamente en mortalidad y morbilidad (admisiones hospitalarias por enfermedades respiratorias, admisiones hospitalarias por enfermedades cardiovasculares, visitas a salas de urgencia por enfermedades respiratorias, días de actividad restringida, enfermedades respiratorias bajas en niños, bronquitis crónicas, síntomas respiratorios agudos y ataques de asma). Para ello se usan funciones de daño o concentración-respuesta lineales recopiladas por Sánchez, Valdés y Ostro (1998) y los ponderadores utilizados por dichos autores para el escenario medio.²⁸

Para calcular los cambios en riesgos de salud de la población se utiliza la siguiente ecuación:

$$\Delta ES_i = \alpha * Pobl_i * \Delta MP10_i$$

donde:

ΔES_i = Cambio en el riesgo salud de la población, del efecto en salud i

α = ponderador de la función de daño, equivale a la pendiente de la misma

$Pobl_i$ = Población en riesgo relativo al efecto en salud i

$\Delta MP10_i$ = Cambio en la concentración atmosférica de MP10

²⁸ Las funciones de daño o dosis-respuesta buscan enlazar la exposición a contaminantes atmosféricos de una población, con diferentes efectos de salud observados en la misma población, entregando como resultado un número de casos (morbilidad) o vidas perdidas (mortalidad).

Como población expuesta o afectada se considera al total de población de la provincia de Santiago, ya que como se dijo anteriormente, se estimó un efecto parejo para toda la ciudad. Estas cifras son reportadas por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE).

En algunos casos, las funciones de daño requieren el uso de las admisiones hospitalarias en lugar de población en la ecuación anterior. En estos casos, se usan los datos entregados por el Departamento de Estadísticas e Información de Salud (DEIS) del Ministerio de Salud (MINSAL) para todos los Servicios de Salud de la región, los que se encuentran desglosados únicamente para los años 2008 y 2009, y de los que se usan los correspondientes al periodo abril-agosto. Para el año 2007, sólo están disponibles los datos de hospitalizaciones totales para la región, por lo cual, para establecer las admisiones hospitalarias específicas para las enfermedades en cuestión, se supuso que la proporción de éstas era igual a la proporción promedio de los años 2008 y 2009. Cabe destacar, que sólo se utilizan las admisiones hospitalarias del sector público, debido a que los registros del sector privado no se encuentran disponibles, razón por la cual se puede indicar que las estimaciones para las admisiones hospitalarias estarían ligeramente subvaluadas, aún cuando se considera suficiente la información ya que el sector público representa más del 70% de las atenciones totales.

Para las enfermedades respiratorias bajas se consideraron las atenciones por neumonía (J12-J18), bronquitis y bronquiolitis aguda (J20-J21) y crisis obstructiva bronquial (J40-J46). Además se consideró la tasa de mortalidad cruda calculada por CEPAL para el quinquenio 2005-2010 de 5,36 muertes por 1.000 habitantes, debido a que aún no se cuenta con los datos oficiales de mortalidad para el año 2009.

Tabla 4: Número de casos no sucedidos producto de la reducción de la contaminación desde el año 2007

Motivo	2007	2008	2009	2010	Total
Mortalidad					
	123	124	126	127	500
Morbilidad					
Admisiones hospitalarias por enfermedades respiratorias	28	27	36	11	103
Admisiones hospitalarias por enfermedades cardiovasculares	12	13	13	14	52
Visitas a sala de urgencia por enfermedades respiratorias	140	137	182	56	515
Días de actividad restringida	432.545	439.605	382.800	335.648	1.590.598
Enfermedades respiratorias bajas en niños (bronquitis y tos)	690	677	659	1041	3.067
Bronquitis crónica	842	856	870	885	3.453
Síntomas respiratorios agudos	3.430.149	3.458.243	3.550.236	3.632.551	14.071.179
Ataques de asma	63147	63721	64297	64871	256.036

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 4 presenta las estimaciones de efectos para el escenario de nivel medio producto de la disminución de la concentración promedio de MP10 desde el 2007 al 2010 atribuible al Transantiago.

Para la valoración económica de los impactos en salud se usaron los cálculos realizado por Holz (2000), los que debieron ser actualizados a

precios del 2010. Holz (2000) calcula para cada enfermedad tanto sus costos directos como indirectos. Los primeros se definen en función de los costos promedio de tratar la enfermedad. Dichos valores fueron actualizados según la variación del índice de precios al consumidor de salud reportado por el INE. Los segundos representan los días de trabajo perdidos, tanto por la enfermedad del individuo enfermo en hospitalizaciones y atenciones de urgencia, como por las horas de trabajo perdidas por quienes deben acompañar a menores de edad en dichos procedimientos. Estos costos se actualizaron mediante la variación del Índice de Remuneraciones Generales (French-Davis, 2010).

Los valores finales utilizados se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5: Costos de cada enfermedad (CH\$ del 2010)

Motivo	Valor (Pesos de 2010)
Mortalidad	30.797.105
Admisión hospitalaria por enfermedades respiratorias	978.703
Admisión hospitalaria por enfermedades cardiovasculares	19.683.872
Visitas de sala de urgencias	44.765
Enfermedad baja en niños	100.846
Bronquitis crónica	82.704.641
Síntomas respiratorios agudos	5.308
Ataques de asma	100.293
Día de Actividad Restringida	9.399

Fuente: Elaboración propia. Actualización de valores de Holz (2000)

Considerando todo lo anterior, para el escenario medio se estiman los ahorros por menores costos de salud presentados en la Tabla 6. Estos se estiman en CH\$ 104 mil millones en promedio entre los años 2007 y 2010. Esta cifra corresponde a un valor de cerca de US\$ 216 millones al año.²⁹

Tabla 6: Ahorros producto del Plan Transantiago (CH\$ 2010)

Motivo	Ahorro Promedio Anual	Ahorro total (2007-2010)
Mortalidad	3.849.506.307	15.398.025.228
Admisión hospitalaria por enfermedades respiratorias	25.188.132	12.771.776
Admisión hospitalaria por enfermedades cardiovascular	254.540.255	7.983.244
Visitas de sala de urgencias	5.760.370	19.157.535
Enfermedad baja en niños	3.737.503.053	14.950.012.213
Bronquitis crónica	77.315.647	230.590.434
Síntomas respiratorios agudos	71.395.455.453	284.810.738.064
Ataques de asma	18.674.097.709	37.059.659.392
Día de Actividad Restringida	6.419.628.688	15.882.447.350
	104.438.995.614	368.371.385.237

Fuente: Elaboración propia.

Por último, la Tabla 7 muestra el desglose de los costos directos e indirectos evitados. Este desglose permite esclarecer qué proporción de este ahorro es percibido por el sector público y cuál por los agentes privados. Se observa que del total de los costos, 12,5% equivale al ahorro fiscal por concepto de menores prestaciones médicas, considerando que este estudio no incluye datos para el sector privado de salud. La mayor parte del ahorro es internalizada por los agentes privados.

²⁹ Se utiliza un tipo de cambio de CLP 480 por USD.

Tabla 7: Desglose de los costos directos e indirectos en Salud, 2007-2010

Motivo	Total Casos	Costos directos (CH\$)	Costos indirectos (CH\$)
Mortalidad	500	-	15.398.025.228
Admisiones hospitalarias por enfermedades respiratorias	103	87.980.750	12.771.776
Admisiones hospitalarias por enfermedades cardiovasculares	52	1.010.177.775	7.983.244
Visitas a sala de urgencia por enfermedades respiratorias	515	3.883.944	19.157.535
Días de actividad restringida	1.590.598	-	14.950.012.213
Enfermedades respiratorias bajas en niños	3.067	78.672.156	230.590.434
Bronquitis crónica	3.453	771.083.748	284.810.738.064
Sintomas Respiratorios Agudos	14.071.179	37.636.731.444	37.059.659.392
Ataques de Asma	256.036	9.796.067.401	15.882.447.350
Total		49.384.597.218	368.371.385.237

Fuente: Elaboración Propia.

7. Conclusiones

En el presente trabajo se estimó una disminución de $3,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las concentraciones atmosféricas de MP10 en la ciudad de Santiago desde el año 2007, lo que es coincidente con el año de la implementación del plan de reforma y reestructuración del sistema de transporte público de la ciudad, conocido como Transantiago. Este resultado sería consistente con la hipótesis planteada aquí de que la reforma del transporte público habría contribuido a la descontaminación de la capital. Este efecto se estima aislado de la influencia de otras variables relevantes (confundentes) como las restricciones del suministro de gas proveniente de Argentina, las condiciones meteorológicas, y una tendencia

decreciente en el tiempo en los niveles de contaminación en Santiago debido a cambios tecnológicos, de estructura económica, etc.

Utilizando una metodología de funciones dosis-respuesta y de valoración económica se obtiene que en promedio cada año se logra un ahorro de más de CH\$104.439 millones (o más de US\$200 millones) como consecuencia de la reducción de las concentraciones atribuibles al plan de transportes, de los cuales aproximadamente el 12% equivale a ahorro fiscal por concepto de gasto en salud.

Cabe señalar además que el ahorro total anual del CH\$104.439 por la reducción de la contaminación estimada en este trabajo, es cercano al subsidio permanente establecido para el plan de transportes de la capital en la Ley 20.378 del año 2009 y que asciende a CH\$115.000 millones anuales.

También es interesante observar que de acuerdo al modelo estimado en el presente trabajo, los cortes en la provisión de gas natural proveniente de Argentina —que justamente se intensificaron a partir del año 2007— tuvieron un impacto en las concentraciones de material particulado de sentido contrario al provocado por el Transantiago, y que supera en magnitud la reducción estimada como consecuencia de la implementación de dicho plan de modernización del transporte público. En efecto, mientras que el Transantiago redujo la

contaminación en cerca de $3,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, los días con 100% de corte de suministro de gas argentino implicaron un aumento de cerca de $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las concentraciones de material particulado. Estos resultados sugieren que el efecto negativo de estos cortes en el suministro de gas Argentino enmascaró el efecto benéfico del Transantiago sobre las concentraciones de MP10, que no se pudo observar inmediatamente después de su puesta en marcha el año 2007.

La metodología usada, tiene diversas limitaciones que responden al hecho de trabajar con datos agregados, como también, a la escasez de datos relacionados al fenómeno analizado. Para aumentar los niveles de confianza de los beneficios estimados, quedan abiertas algunas líneas de investigación a desarrollar. Primero, la incorporación a los modelos estimados de variables concernientes a la intensidad de uso de modos de transporte, tanto del parque automotriz como del transporte público, que permitan esclarecer los cambios en la asignación modal de los viajes. En segundo lugar, avanzar en una identificación geográfica más localizada de los cambios en las concentraciones de contaminantes productos del plan estudiado, lo que permitiría cuantificar de forma más precisa los efectos sobre los segmentos de la población realmente afectados. Por último, es necesario levantar información acabada y actualizada, con base médica, de los costos de los padecimientos de las enfermedades, tanto en su forma directa como indirecta, teniendo en cuenta las variaciones en los precios

relativos y las mejoras tecnológicas que se han producido desde el estudio empleado para la valoración (Holz, 2000).

Este trabajo aporta desde una sola dimensión a la valoración completa del plan de transporte de Santiago, ya que existen otros beneficios tales como posibles reducciones en los tiempos de espera, viajes más expeditos, disminución de la contaminación acústica, reducción de accidentes y mejores condiciones laborales de los choferes, que no fueron contemplados. Debe considerarse también que el análisis realizado representa una mirada parcial del plan, en cuanto no hace referencia a los posibles costos del mismo.

8. Referencias

Arellano, M. and S. Bond (1991), 'Some tests of Specification for Panel data: Montecarlo Evidence and an Application to Employment Equations', *Review of Economic Studies*, 58, pp. 277-292.

Atal, R. (2009), "Efectos de las medidas de Gestión de Episodios Críticos en la calidad del aire en Santiago, Chile", Instituto de Economía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.

Centro Mario Molina Chile (2007), *Estudio 'Evaluación del Impacto de Transantiago en la Calidad del Aire de la Región Metropolitana, año 2007'*, Informe Final, N°BIP 30069882-0.

Clerc, J. (2007), "Valoración de mejoras ambientales en Santiago: Teoría, supuestos y aplicación", Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago.

CONAMA Región Metropolitana (2006), *Informe Seguimiento Plan de Prevención y de Descontaminación para la Región Metropolitana*, CONAMA RM, Santiago.

CONAMA Región Metropolitana (2009), *Resultados Plan Operacional para la Gestión de Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica por Material Particulado Respirable MP10*, CONAMA RM, Santiago.

ENAP (2004), *Memoria Anual*, Santiago.

Fernando, H.J.S., Mammarella, M.C., Grandoni, G., Fedele, P., Di Marco, R., Dimitrova, R., y Hyde, P. (2012), "Forecasting PM10 in metropolitan areas: Efficacy of neural networks". *Environmental Pollution* 163: 62-67.

Ffrench-Davis, R. (2010), "Economic Reforms in Chile. From Dictatorship to Democracy" Palgrave Macmillan, Londres.

Gallego, F., J.P. Montero y C. Salas (2011), 'The Effect of Transport Policies on Car Use: Theory and Evidence from Latina American Cities', Draft, Departamento de Economía, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Garreaud, R. D. y J. Rutllant (2006), 'Factores meteorológicos de la contaminación atmosférica', en R. Morales (ed.), *Contaminación Atmosférica Urbana Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago*, pp. 36-40. Editorial Universitaria. Santiago, Chile.

Gassebner, M., M.J. Lamla y J-E Sturm (2011), 'Determinants of Pollution: what do we really know?', *Oxford Economic Papers*, 63, pp. 568-595.

Gómez-Lobo, A. (2012), 'The Ups and Downs of a Public Transport Reform: the case of Transantiago', mimeo, Department of Economics, University of Chile.

Holz, J. (2000), "Estimación de Costos Unitarios en Morbilidad y Mortalidad y su aplicación para calcular los beneficios del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana", Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, Universidad de Chile, Santiago.

Judson, R.A. and A.L. Owen (1999), 'Estimating dynamic panel data models: a guide for macroeconomists', *Economic Letters*, 65, pp. 9-15.

Merino, M, (2006), 'Factores Episodios de alta concentración de contaminantes: material particulado MP10 y ozono troposférico', en R. Morales (ed.), *Contaminación Atmosférica Urbana Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago*, pp. 56-60. Editorial Universitaria. Santiago, Chile.

Merino, M, G. Alvarado, & E. Figueroa (2005), 'Aire', en Geo Chile (ed.), *Estado del Medio Ambiente en Chile: Informe País*, LOM Impresiones. Santiago, Chile. pp. 37-70.

Ministerio Secretaría General de la Presidencia (1996), Decreto Supremo N° 131.

Ostro, B. (1998), "Cómo estimar los efectos de la contaminación atmosférica en Salud", Centro de Estudios Públicos, Santiago.

Sánchez, J., Valdés, S., y Ostro, B. (1998), "Estimación de los beneficios en salud del Plan de descontaminación de Santiago", *El Trimestre Económico*, 363-406.

Sectra (2007), "Análisis Ambiental de las Emisiones del Actual Sistema de Transporte Público de Buses de Santiago año 2007", Secretaria Interministerial de Transportes, Santiago.

Song, S., Wu, Y., Jiang, J., Yang, L., Cheng, Y. y Hao, Y. (2012), "Chemical characteristics of size-resolved PM_{2.5} at a roadside environment in Beijing, China. *Environmental Pollution*, 161: 215-221