



“EFECTO DE LA EXTENSIÓN DEL METRO DE SANTIAGO SOBRE EL NIVEL DE MATERIAL PARTICULADO 2,5”

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN ANÁLISIS ECONÓMICO**

**Alumno: Matías Flores Ayala
Profesor Guía: Eugenio Figueroa Benavides**

Santiago, Abril 2024

Abstract

Esta investigación analiza la relación entre la expansión de la red de Metro en la ciudad de Santiago y el nivel de contaminación atmosférica en Santiago, medido a través del material particulado 2,5. Se utiliza una estrategia de identificación de diferencias en diferencias, aprovechando la extensión de la Línea 5 del Metro como un experimento natural. Los resultados muestran una relación negativa entre ambas variables, con una reducción promedio de $3,210 \frac{\mu g}{m^3}$ en el nivel de material particulado 2,5. Esto indica que la red de Metro disminuye en un 11,6% el nivel de contaminación ambiental. Además, la estimación obtenida es robusta ante posibles errores clusterizados y niveles de contaminación ambiental que no están relacionados con los contaminantes emitidos por los vehículos particulares (como el O_3), que es el canal de efecto examinado en esta investigación.

The following research aims to analyze the relationship between the expansion of the subway network in Santiago and the level of environmental pollution measured as 2.5 particulate matter. Using a difference-in-differences strategy and taking advantage of the expansion of line 5 of the subway as a natural experiment, a negative relationship is found between these two variables of $3.210 \frac{\mu g}{m^3}$ on average. The subway network reduces the level of 2.5 particulate matter by 11.6%. This estimate is robust to clustered errors and environmental pollution levels that are not related to pollutants emitted by private vehicles (O_3), which represent the channel of effect examined in this research.

Palabras clave: Contaminación ambiental, material particulado 2,5, diferencias en diferencias, red de Metro, transporte público.

Bullet points:

- Se estudia el efecto de la extensión del Metro en Santiago en el $MP_{2,5}$.
 - Se aprovecha, como variación exógena, la extensión de la Línea 5 del Metro.
 - Utilizando diferencias en diferencias, se encuentra efecto negativo de $3,210 \frac{\mu g}{m^3}$.
 - Efecto no significativo en O_3 , contaminante no relacionado a autos particulares.
 - Evidencia a favor de que red de Metro ayuda a mejorar la calidad del aire.
-

1. Introducción

En los últimos años, la preocupación por el nivel de contaminación ha ido en aumento. Esto se debe a que, según la ciencia disponible, la forma de vida actual, el desarrollo y la estabilidad de la sociedad presente se verán severamente afectados (IPCC, 2023). Por esta razón, es necesario tomar medidas que enfrenten esta situación adversa, fomentando el desarrollo sustentable y la descontaminación de las principales ciudades.

Una de las principales variables para medir el nivel de contaminación ambiental es el material particulado (MP), el cual se define como una mezcla de partículas líquidas o sólidas suspendidas en el aire (cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento, polen, etc.) que difieren en tamaño, composición y origen. Este se clasifica según su diámetro aerodinámico, en donde los más comunes son 10 y 2,5 micrómetros (μm).

El origen de estos contaminantes es variado. El $MP_{2,5}$ proviene principalmente de las emisiones de motores a diésel, mientras que la composición del MP_{10} es principalmente de tipo natural, como el polen o partículas de polvo.

La contaminación de este tipo es sumamente perjudicial para la salud de las personas, especialmente el $MP_{2,5}$, que debido a su tamaño pequeño, es más fácil que se aloje dentro de las vías respiratorias y afecte a la salud de aquellos que inhalen estos contaminantes. Según un estudio realizado por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2013), los efectos en la salud perjudiciales del MP inhalable se deben tanto a la exposición a corto plazo (horas, días) como a largo plazo (meses, años), e incluyen morbilidad respiratoria y cardiovascular, tales como asma y síntomas respiratorios y mortalidad debido a problemas respiratorios, cardiovasculares y cáncer de pulmón.

En cuanto a la situación en el país, Chile se encuentra entre los países de la OCDE con los niveles más altos de contaminación de $MP_{2,5}$ per cápita. Como lo muestra la Figura 2, el año 2020, Chile ocupa el quinto lugar en cuanto a contaminación ambiental medida en kilogramos de $MP_{2,5}$ por persona, con un total de 6kg. Además, la exposición a este contaminante es preocupante, ya que en 2019 la población estuvo expuesta a un promedio de $23,7 \frac{\mu g}{m^3}$ de $MP_{2,5}$, el tercero más alto dentro de los países de la OCDE (ver Figura 3). Además, como se observa en la Figura 4, el 98,6% de la población chilena está expuesta a niveles de $MP_{2,5}$ por encima del límite recomendado por la OMS ($10 \frac{\mu g}{m^3}$), lo que representa un grave riesgo para la salud pública.

En el contexto de la preocupación que el cambio climático y la contaminación ambiental generan en el país y sus habitantes, la Encuesta Nacional de Medio Ambiente del año 2017 muestra que la contaminación del aire es el principal problema ambiental en Chile, con un 38,4%. Según el Ministerio del Medio Ambiente, las actividades más contaminantes del aire a nivel nacional son

la calefacción a leña (32,7%), el transporte (30,5%) y las industrias (28,1%), mientras que para la Región Metropolitana, estas son el transporte (41,1%) y las industrias (36,1%) (MMA-Chile, 2017).

Además, según los expertos en salud, el alto nivel de contaminación ambiental es preocupante y se estima que el 12% de las muertes anuales en Chile se deben a factores ambientales modificables. Asimismo, cerca del 60% de la población se encuentra expuesta a concentraciones de material particulado superiores a lo permitido por la regulación ambiental, lo que causa cerca de 3.000 hospitalizaciones y 4.500 defunciones cada año (U. de Chile, 2021).

Teniendo en cuenta esta preocupante situación para la salud, y como lo señalan Figueroa et al (2013), Merino et al (2005) y Ostro et al (1998), el transporte público constituye una vía para reducir el alto flujo vehicular de las ciudades y disminuir los altos niveles de contaminación ambiental por MP. En particular, los medios de transporte con tecnología avanzada que sean capaces de disminuir los niveles de contaminantes emitidos al ambiente son una buena alternativa.

Actualmente, en Chile, se cuenta con una red de Metro subterráneo de gran calidad y modernidad. La red de Metro de Santiago fue inaugurada en 1975 con la Línea 1 y, hoy en día, se compone de 7 líneas, que ofrecen servicio a 23 comunas de la Región Metropolitana, con un recorrido de 140 kilómetros de longitud y un total de 136 estaciones, trasladando a 2,3 millones de personas diariamente (DTP, 2020).

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo analizar cuál es el efecto que ha tenido la extensión de la red de Metro de Santiago sobre el nivel de contaminación ambiental en la ciudad, en especial de $MP_{2,5}$.

El estudio está organizado de la siguiente manera: en la próxima sección se hace un análisis de la literatura relacionada a contaminación ambiental, congestión vehicular, transporte público y salud. Luego, se revisan los canales de efecto del transporte público sobre el nivel de calidad del aire. Después se detallan los datos a utilizar y la estrategia de identificación propuesta, junto con el modelo econométrico, para encontrar el efecto que tiene la extensión de la red de Metro de Santiago sobre el nivel de contaminación ambiental de la ciudad. A continuación se presenta la estadística descriptiva de los datos, los resultados del modelo econométrico y un análisis de robustez. Finalmente se realiza un conclusión y propuestas de política pública em base a los resultados disponibles, además de propuestas para investigaciones futuras.

2. Revisión de la literatura

2.1. Contaminación ambiental, congestión vehicular y transporte público

Para la presente investigación es fundamental considerar los trabajos previos relacionados con los tres temas y cómo están interconectados. Diversos estudios han establecido los efectos que los sistemas de transporte público tienen sobre el flujo y la congestión vehicular. Por ejemplo, Anderson (2014) concluye que la oferta de transporte público reduce el flujo vehicular en las calles, lo que a su vez disminuye los niveles de contaminación ambiental (Levy et al, 2010). Por otra parte, existen también trabajos que no encuentran una relación significativa entre estos hechos, es decir, que la reducción de flujo vehicular, derivada del mayor uso de transporte público, no reduzca los niveles de contaminación (Goel & Gupta, 2014). Para el caso de Chile, Figueroa et al. (2023) señalan, que en la década pasada, se duplicó la extensión del Metro de Santiago, el que, al ser un medio subterráneo y eléctrico, ayudó a descongestionar y descontaminar la ciudad.

Por otro lado, existen investigaciones que relacionan directamente a los sistemas de transporte público y el nivel de contaminación ambiental. En su mayoría, se establece una relación negativa entre estos dos hechos, lo que implica que una mayor oferta de transporte público disminuye los niveles de contaminación. La diferencia entre estos trabajos son las estrategias de identificación utilizadas y las significancias estadísticas obtenidas para los distintos contaminantes del aire (MP, CO, O_2 , etc.).

Entre las investigaciones relevantes se encuentra el trabajo de Zheng (2019) que utiliza el método de diferencias en diferencias y muestra que la extensión de la red de Metro en Changsha (China) implicó una disminución en CO de un 18%, pero no se encuentran efectos significativos para niveles de material particulado. Por otro lado, el trabajo de Xiao et al (2020) mediante el método de diferencias en diferencias espacial¹, concluye que el desarrollo del Metro en China disminuyó los niveles de $MP_{2,5}$ y MP_{10} en un 1,3%, pero no tuvo impacto en O_3 , CO, O_2 ni NO_2 .

Además, se han encontrado efectos no significativos e incluso negativos en la calidad del aire en Estados Unidos (Beaudoin & Lin Lawell, 2016).

En el caso específico de la red de trenes subterráneos, esta puede actuar como un sustituto de los vehículos particulares, reduciendo la contaminación gracias al uso de medios de transporte público. Según Topalovic et al. (2012), estas redes de trenes subterráneos son el medio más efectivo para reducir la congestión y las emisiones de gases invernadero.

Estudios realizados en Chile muestran que en el año 2000, el sector transporte de Santiago

¹ Este método toma en cuenta el hecho de que la contaminación medida en un centro de medición puede expandirse hacia otros centros, generando un sesgo.

aportaba el 37,7% de las emisiones de MP_{10} por fuentes móviles y estacionarias, mientras que los buses aportaban el 6,7% y la industria el 27% (DICTUC, 2007). Es decir, a mediados de la década pasada, el transporte público seguía representando una fracción significativa de las emisiones de material particulado en la ciudad. En el 2007 se implementó una ambiciosa reforma integral al sistema público de Santiago, llamada TranSantiago, que incluía un conjunto de medidas, entre otras, el reordenamiento completo de las rutas, la introducción de un sistema de pago electrónico y la integración tarifaria entre los distintos servicios de buses y entre los buses y el Metro.

Por otra parte, Gallego, Montero y Salas (2013) muestran que la reforma del transporte público implementada en la ciudad de Santiago en el año 2007 aumentó el flujo vehicular y los niveles de contaminantes en el aire. Esto se debió a una mala coordinación y planificación de la reforma, lo que aumentó los costos y tiempos asociados a los viajes en transporte público, haciendo que relativamente los viajes en vehículos particulares tuvieran una mayor utilidad. Esto demuestra que la calidad del servicio es clave para determinar si existirá o no una sustitución entre transporte público y vehículos particulares por parte de los ciudadanos.

2.2. Contaminación ambiental, salud y capital humano

Es importante también examinar económicamente el efecto que la contaminación atmosférica tiene en la salud de la población y el nivel de capital humano.

Como se mencionó previamente, la Organización Mundial de la Salud ha estudiado exhaustivamente los efectos que el $MP_{2,5}$ tiene en la salud. Estos efectos van desde una simple inflamación de las vías respiratorias o molestias en la parte superior de estas (nariz, amígdalas) hasta complicaciones más graves, como asma, problemas respiratorios mortales e incluso cáncer de pulmón.

Un meta análisis realizado en China (Pui, Chen & Zuo, 2013) demostró que, en general, hay efectos positivos y estadísticamente significativos entre la exposición en el corto plazo al $MP_{2,5}$ y el riesgo a morbilidad (hospitalizaciones y visitas de urgencia), así como la mortalidad relacionada con problemas cardiovasculares y respiratorios. Estos problemas de salud encontrados en China son los mismos que se encuentran en países desarrollados (USEPA, 2009b).

Además, según un estudio realizado en Alemania (Kappos et al, 2004), la exposición a largo plazo a MP durante años o décadas está asociada con mortalidad cardiovascular e infantil, así como síntomas respiratorios, crecimiento de los pulmones y fallas en el sistema inmunitario. La exposición a corto plazo está asociada con mortalidad y morbilidad en el mismo día o los días subsecuentes. En especial, los efectos más fuertes se asocian con el $MP_{2,5}$ seguido del MP_{10} .

Estos efectos del MP sobre la salud tienen consecuencias en la formación del capital humano.

Bharadwaj et al (2016) analizaron en Chile el impacto que la exposición a la contaminación (en el momento de la gestación) tendría sobre el nivel de capital humano medido como el desempeño en las pruebas SIMCE de Lenguaje y Matemática.

Se argumenta que el rendimiento escolar es importante para explicar el nivel de empleo y salario en la vida adulta de estos individuos (Chetty et al 2011, Currie and Thomas 2001). Debido a esto, el legado de la exposición de estos agentes contaminantes del aire (estando en el útero) pueden ser duraderos y económicamente significativos.

Los resultados muestran evidencia negativa y fuerte de la exposición del feto a los niveles de CO_2 y MP_{10} en las pruebas de SIMCE de Lenguaje y Matemática. Se concluye que la disminución de estos contaminantes del aire afecta positivamente al desarrollo del capital humano. Sabiendo que el $MP_{2,5}$ tiene mayores efectos negativos sobre la salud que el MP_{10} , es plausible que los efectos sobre el capital humano también sean mayores.

Teniendo en cuenta la literatura relacionada, la hipótesis de esta investigación es que la extensión de la red de Metro de Santiago y la mayor oferta de transporte público reducen el nivel de congestión vehicular y, por lo tanto, disminuyen el nivel de contaminación ambiental, especialmente del $MP_{2,5}$, el cual es el más dañino para la salud de las personas.

Este estudio es relevante y aportará de manera significativa, ya que identifica por primera vez el efecto directo que tiene el Metro sobre la contaminación ambiental en Santiago de Chile mediante la aplicación de un método econométrico basado en un experimento natural. Se espera también que el estudio contribuya a la comprensión de los diferentes efectos y de las significancias encontradas en la literatura para distintas estrategias de identificación y contaminantes ambientales.

3. Canales de efecto

La evidencia empírica mixta en cuanto a los efectos del transporte público sobre el nivel de calidad del aire genera ambigüedad en el análisis teórico (Vickrey, 1969; Mohring, 1972). Para entender el efecto final, es necesario considerar dos efectos contrapuestos:

- Creación de tráfico: El aumento de la actividad económica debido al nuevo tránsito intra-ciudad generado por la mayor oferta de transporte público aumenta el volumen de tráfico, y por ende, la contaminación ambiental.
- Desvío de tráfico: Personas que usan un vehículo particular como su medio de transporte principal, utilizan ahora el transporte público debido a la mayor oferta de este, reduciendo así la contaminación ambiental gracias a las menores emisiones per cápita de los contaminantes del transporte público.

Es interesante analizar el efecto final de la implementación de la extensión del Metro de Santiago en la contaminación ambiental, ya que estos dos efectos contrapuestos requieren ser evaluados para determinar cuál de ellos predomina.

4. Datos

Para medir el nivel de contaminación en Santiago, se utilizan datos de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire y Variables Meteorológicas de la Región Metropolitana de Santiago (Red MACAM-RM) del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA). La red consta de 14 estaciones de monitoreo de calidad del aire distribuidas en la Región Metropolitana, que miden las concentraciones ambientales de diferentes contaminantes del aire, como el MP_{10} , $MP_{2,5}$, ozono (O_3) y monóxido de carbono (CO). Se utilizarán los promedios móviles diarios² del $MP_{2,5}$ de cada estación de monitoreo debido a su potencial daño a la salud de las personas. Las concentraciones se miden en microgramos por metro cúbico ($\frac{\mu g}{m^3}$).

Es importante tener en cuenta que cada estación de monitoreo de la red MACAM-RM es representativa en un radio de 2 kilómetros y, por lo tanto, mide las concentraciones de los contaminantes en ese radio³.

Para las variables explicativas, se considerará el Índice Mensual de Actividad Económica⁴ (IMACEC) extraído de la base de datos estadísticos del Banco Central de Chile, para controlar por el crecimiento económico de la Región Metropolitana y su relación con la contaminación ambiental. Además, se utilizará como proxy de flujo vehicular, ya que no existen datos fiables de esta variable que proporcione la Unidad Operativa de Control de Tránsito (UOCT).

Finalmente, para las variables meteorológicas que se utilizan como controles, se usarán el nivel promedio diario de precipitaciones (mm), las temperaturas diarias promedio (°C), y la velocidad ($\frac{m}{s}$) y dirección del viento (°). Estos datos se obtuvieron de la Dirección General de Aguas y del Sistema de Información de Calidad del Aire (SINCA), y son importantes porque afectan directamente la concentración de partículas suspendidas en el aire.

Para la estimación, se utilizan datos diarios para el periodo 2009-2017 para todas las variables descritas anteriormente. Solo se utilizan datos de 9 de las 14 estaciones de monitoreo de la red MACAM-RM, ya que no todas tienen datos para los años incluidos en esta investigación.

En el Cuadro 1, se muestra la lista de estaciones de monitoreo de la red MACAM-RM y la distancia

² Promedio de las concentraciones en cada hora, tomado para las 24 horas anteriores a la hora especificada.

³ Esta información se solicitó mediante la Oficina de Informaciones, Reclamos y sugerencias (OIRS) a la SEREMI de Medio Ambiente mediante un requerimiento formal.

⁴ Se analizará si los resultados difieren al agregar este índice de forma mensual o si se interpola diariamente.

a la que se encuentran de la estación de Metro más cercana:

Cuadro 1: Estaciones de monitoreo y distancia a estación de Metro más cercana (en kilómetros)

Estación de monitoreo	Estación de Metro más cercana	Distancia (km)
Cerrillos I	Cerrillos	2,39
Cerro Navia	San Pablo	1,48
El Bosque	La Cisterna	1,07
La Florida	Vicuña Mackenna	0,80
Las Condes	Los Dominicos	3,95
Pudahuel	Pudahuel	1,15
Puente Alto	Protectora de la Infancia	1,39
Quilicura I	Los Libertadores	5,23
Parque O'Higgins	Parque O'Higgins	0,45

Fuente: Elaboración propia en base a medición de distancias de Google Maps.

En el Cuadro 1 se puede observar que las estaciones de monitoreo ubicadas en Cerro Navia, El Bosque, La Florida, Pudahuel, Puente Alto y Parque O'Higgins tienen, dentro del rango de medición (2km), alguna estación de Metro. Por otro lado, las estaciones de monitoreo Cerrillos I, Las Condes y Quilicura I no tienen una estación de Metro cercana. Este hecho será relevante posteriormente para definir el grupo tratado y el grupo control en la estrategia de identificación.

5. Estrategia de identificación

Para identificar el efecto de la extensión de la red de Metro de Santiago sobre el nivel de contaminación, es necesario considerar la endogeneidad que se origina debido a que la decisión de construir una estación de Metro depende de las características del sector donde se extiende la red. En efecto, las estaciones de Metro se suelen construir en sectores donde previamente existe un desarrollo considerable como centros comerciales, hospitales, intermodales, etc, lugares donde, además hay mayor congestión vehicular, y por ende, mayor contaminación ambiental. Además, existen muchas variables que podrían afectar al nivel de contaminación en un sector específico, lo que resulta en un problema de variable relevante omitida.

Para abordar estas fuentes de posibles sesgos, se utilizará una estrategia de diferencias en diferencias, explotando la extensión de la Línea 5 del Metro de Santiago desde la estación Gruta de Lourdes hasta la estación Pudahuel, inaugurada el 12 de enero de 2010.

Se utiliza la estación de monitoreo Pudahuel para medir el nivel de contaminación ambiental que se deriva de la extensión de esta línea debido a que existen datos sobre el nivel de contaminación antes y después de la fecha de la implementación de esta extensión, y porque se encuentra dentro del rango de representatividad de las estaciones de monitoreo de contaminantes del aire. Además, es importante destacar que no existía ninguna estación de Metro antes de esta

extensión, lo que es clave para poder identificar el efecto causal.

Para controlar por las diferencias sistemáticas en las concentraciones de material particulado de las distintas zonas de la ciudad, se incorporan efectos fijos por estación de monitoreo. También, se agregan efectos fijos temporales para considerar la variabilidad sistemática en la actividad y contaminación en los meses del año y los días de la semana con mayor actividad junto con controles por episodios críticos de contaminación ambiental.

A partir de esto, el modelo a estimar por MCO para medir el efecto causal es el siguiente:

$$MP_{2,5_{it}} = \beta_0 + \beta_1 D_i + \beta_2 T_t + \beta_3 D_i T_t + \varphi_i + \varphi_t + \beta_4 X_{it} + \varepsilon_{it}$$

En el modelo se utiliza la variable $MP_{2,5_{it}}$, que es el promedio móvil de 24 horas de la concentración de $MP_{2,5}$ en cada estación de monitoreo i en cada intervalo diario t . Además, se utiliza la variable D_i como una dummy con valor 1 para la estación de monitoreo Pudahuel y 0 para el resto de las estaciones. La variable T_t también es una dummy con valor 1 para todos los periodos posteriores a la inauguración de la extensión de la Línea 5 del Metro, es decir, después del 12 de enero de 2010, y 0 para antes de esa fecha. El coeficiente de interés, β_3 , captura el efecto causal de la implementación de la extensión del Metro sobre el nivel de $MP_{2,5}$.

Además, se incluyen efectos fijos por estación de monitoreo (φ_i) y temporales (φ_t), controles por el nivel de crecimiento del país (IMACEC) y controles meteorológicos (X_{it}), como la dirección y velocidad del viento, la temperatura promedio y el nivel de precipitación promedio en el día (t) y con un rezago ($t-1$).

Sumado a esto, dentro de los controles meteorológicos, se incluyen 3 controles relacionados a episodios críticos de contaminación ambiental, siendo estos los siguientes tres: alerta, preemergencia y emergencia ambiental. Estas variables se comportan como dummies con valor 1 si el día anterior hubo un anuncio de alguno de estos episodios. En específico, si el nivel de $MP_{2,5}$ se encuentra entre $80 \frac{\mu g}{m^3}$ y $109 \frac{\mu g}{m^3}$ se activa la variable de alerta, preemergencia si está entre $110 \frac{\mu g}{m^3}$ y $169 \frac{\mu g}{m^3}$ y emergencia si el nivel de contaminación es igual o superior a $170 \frac{\mu g}{m^3}$.

En esta especificación, la estación de monitoreo Pudahuel corresponde al grupo tratado, ya que dentro de su rango de medición se encuentra la estación de Metro Pudahuel, la cual forma parte de la extensión de la Línea 5 del Metro. Por otro lado, las estaciones de monitoreo Cerrillos I, Las Condes y Quilicura I, que antes y después del experimento natural no contaban con ninguna estación del Metro de Santiago dentro de los 2 kilómetros de rango de medición, corresponden al grupo control. Esto se puede corroborar en el Cuadro 1.

6. Estadística descriptiva

6.1. Evolución de los datos

Al considerar los datos del Cuadro 1, para la estadística descriptiva, se utilizan únicamente los registros de las estaciones de monitoreo Pudahuel (grupo tratado), Cerrillos I, Las Condes y Quilicura I (grupo control) para la estimación final. Esta selección de datos muestra una tendencia general a la baja en la concentración de $MP_{2,5}$ en el ambiente desde 2009 hasta finales de 2017.

Cuadro 2: Estadística descriptiva por centro de medición pre y post extensión

	Pudahuel		Las Condes		Cerrillos I		Quilicura I	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
$MP_{2,5}$ ($\frac{\mu g}{m^3}$)	31,89	29,25	24,39	22,50	27,80	29,72	28,01	26,80
	(20,61)	(21,66)	(10,20)	(11,24)	(15,32)	(18,46)	(14,48)	(15,91)
Dirección viento (°)	207,67	197,03	157,06	161,34	193,62	191,97	190,69	182,82
	(20,64)	(20,80)	(27,10)	(29,74)	(25,91)	(35,97)	(31,53)	(32,78)
Precipitación (mm)	0,85	0,52	0,85	0,52	0,99	0,58	1,00	0,59
	(4,63)	(3,03)	(4,63)	(3,03)	(5,32)	(3,16)	(5,37)	(3,21)
Temperatura (°C)	16,43	16,20	15,28	15,06	16,20	16,74	16,09	15,82
	(5,05)	(5,27)	(4,99)	(5,12)	(4,90)	(5,02)	(7,99)	(5,50)
Velocidad viento ($\frac{m}{s}$)	1,79	1,43	1,31	1,42	2,00	2,09	1,46	1,58
	(0,73)	(0,65)	(0,26)	(1,10)	(0,83)	(0,82)	(0,69)	(0,79)
IMACEC	69,72	89,04	69,72	89,04	72,97	88,02	72,94	87,42
	(4,56)	(7,07)	(4,56)	(7,07)	(2,58)	(6,79)	(2,60)	(6,65)

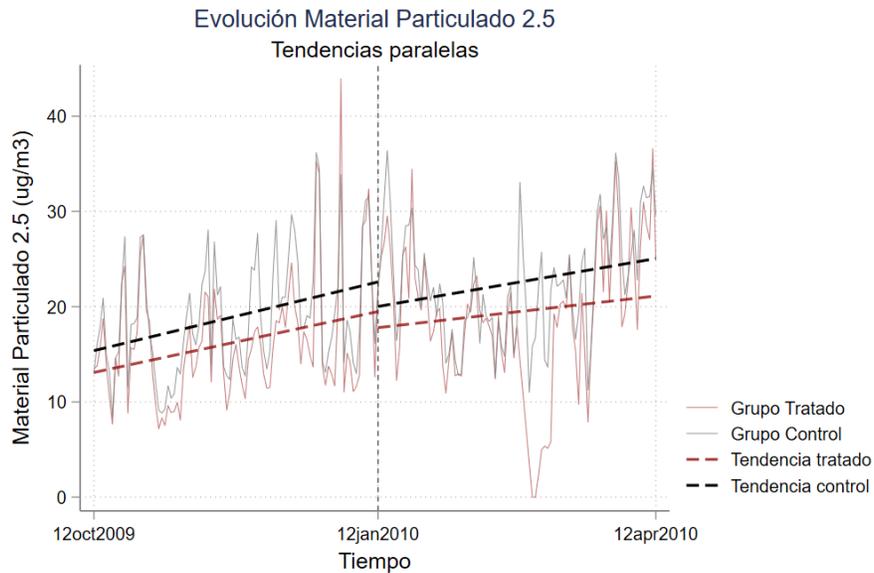
Fuente: Elaboración propia en base a datos de SINCA, Banco Central de Chile y la Dirección General de Aguas.

En el Cuadro 2, se puede observar una disminución en los niveles promedio de $MP_{2,5}$ en las estaciones Pudahuel, Las Condes y Quilicura I, tanto en la fecha pre y post extensión de la red de Metro. Esta disminución sugiere que la hipótesis podría estar en la dirección correcta y no ser rechazada, es decir, que la implementación del Metro ha llevado a una disminución en los niveles de $MP_{2,5}$.

Otro factor importante a considerar es el nivel de precipitación promedio, que ha disminuido en todas las estaciones de monitoreo. Esto es relevante porque el nivel de precipitación es un predictor importante para el nivel de contaminación ambiental debido a que logra que las partículas suspendidas en el aire precipiten y queden atrapadas a nivel de suelo, lo que reduciría el nivel de contaminación.

6.2. Tendencias paralelas

Figura 1: Tendencias paralelas y evolución material particulado 2,5



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

La Figura 1 muestra que los niveles de $MP_{2,5}$ presentan tendencias paralelas entre el grupo tratado y el grupo control durante los 3 meses previos a la exposición del experimento natural del 12 de enero de 2010. Esta condición es fundamental para el análisis, ya que es un requisito para que la estrategia de identificación de diferencias en diferencias, que se aplicará en esta investigación, pueda capturar el efecto causal que se desea estimar.

7. Resultados

Cuadro 3: Resultados regresión principal

	Modelo1 MP _{2,5} ($\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$)	Modelo2 MP _{2,5} ($\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$)	Modelo3 MP _{2,5} ($\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$)	Modelo4 Ln (MP _{2,5})
Pudahuel_post	-1,638 (1,27)	-7,653* (3,14)	-3,210* (1,44)	-0,116* (0,05)
Controles meteorológicos		X	X	X
IMACEC		X	X	X
Episodios críticos		X	X	X
Efectos fijos estación monitoreo			X	X
Efectos fijos temporales			X	X
Constante	28,851*** (1,15)	59,304*** (11,67)	23,095* (9,72)	3,045*** (0,38)
N	21.580	13.223	13.223	13.223
R²	0,022	0,323	0,504	0,479

*p<0,05, **p<0,01, ***p<0,001

Nota: Desviación estándar de los coeficientes en paréntesis. La variable *Pudahuel_post* corresponde a una dummy que se activa cuando el dato corresponde a la estación de monitoreo Pudahuel y además se mide después de la fecha del experimento natural (12 de enero de 2010). Los controles meteorológicos corresponden a dirección y velocidad del viento, nivel de precipitación promedio (también con un rezago) y la temperatura promedio. La variable IMACEC ha sido interpolada de forma diaria entre meses para que corresponda con los periodos diarios de los datos. Este ejercicio no presenta diferencias significativas entre estimar con interpolación o sin ella. Los 3 modelos han sido estimados con errores clusterizados por centro de medición, por lo que son consistentes ante esta especificación.

En el Cuadro 3 se presentan los resultados de la regresión principal⁵. El Modelo1 analiza el coeficiente de interés β_3 que mide el efecto de la extensión de la Línea 5 del Metro sobre el nivel de $MP_{2,5}$ en la estación de monitoreo Pudahuel. Este modelo no incluye controles meteorológicos, efectos fijos ni controla por IMACEC. Aunque el coeficiente es negativo, no es significativo. En el Modelo2, que considera controles meteorológicos e IMACEC, el coeficiente es negativo y significativo. Esto muestra que estos controles son importantes para estudiar este efecto. Finalmente, el Modelo3 incorpora todos los controles y efectos fijos correspondientes y presenta un coeficiente negativo y significativo al 5%. Este resultado indica que la extensión de la Línea 5 del Metro en Pudahuel está asociada a una disminución de $3,210 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ en promedio, lo

⁵ Resultados detallados en el Cuadro 5.

que representa una reducción del 11,6%, tal como se aprecia en el Modelo4. Este efecto es económica y estadísticamente significativo y es coherente con la literatura que emplea la misma estrategia de identificación. Además, el Modelo3 tiene el valor más alto de R^2 , lo que indica que es el modelo con mejor capacidad para explicar la variabilidad de los datos.

A partir de los resultados y considerando los canales de efecto planteados en la literatura, se concluye que el efecto de 'Desvío de tráfico' se sobrepone al efecto de 'Creación de tráfico' debido a que existe una disminución en el nivel de $MP_{2,5}$ promedio en la estación de Pudahuel. Esto sugiere que la mayoría de las personas cercanas a la estación de monitoreo de Pudahuel, gracias a la mayor oferta de transporte público que implica la extensión de la red de Metro, comenzaron a sustituir el transporte privado por el transporte público, lo que redujo las emisiones per cápita de contaminantes.

8. Análisis de robustez

Con el objetivo de fortalecer la estimación previa, se investiga el impacto que la ampliación de la red de Metro tiene en el nivel medio de ozono (O_3). Esto se debe al canal de efecto propuesto, en el que la disminución de la contaminación ambiental se produce gracias a la sustitución de los vehículos particulares por el Metro. Por lo tanto, es necesario examinar qué tipos de contaminantes emiten los motores de los vehículos particulares.

Los contaminantes emitidos por los vehículos particulares, camiones y buses se dividen en dos tipos. Los contaminantes primarios se caracterizan por ser emitidos directamente al aire por estos vehículos, gracias al proceso de combustión de la gasolina. Los contaminantes secundarios se derivan de ellos gracias a reacciones químicas entre los contaminantes primarios y la atmósfera. De acuerdo con UCS (2018), los principales contaminantes emitidos son el material particulado (2,5 y 10), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el monóxido de carbono (CO), el dióxido sulfúrico (SO_2) y distintos gases de efecto invernadero.

Además, un estudio llevado a cabo en el Reino Unido (Williams, 1987) sobre el impacto de los vehículos en la contaminación del aire y la calidad de este, descubrió que los principales contaminantes emitidos por los motores de estos vehículos son el CO, CO_2 , NO, NO_2 , SO_2 , humo y material particulado.

Dado esto, es importante examinar si la extensión de la red de Metro tiene efectos en contaminantes que no estén relacionados con los emitidos por los motores de los vehículos particulares, camiones o buses.

Cuadro 4: Resultados regresión robustez

	Modelo1	Modelo2	Modelo3
	Ozono (ppb)	Ozono (ppb)	Ozono (ppb)
Pudahuel_post	0,453*** (0,17)	0,885 (1,48)	-0,461 (1,12)
Controles meteorológicos		X	X
IMACEC		X	X
Episodios críticos		X	X
Efectos fijos estación monitoreo			X
Efectos fijos temporales			X
Constante	18,232*** (0,62)	2,248 (3,62)	18,447*** (3,39)
N	22.514	13.773	13.773
R²	0,030	0,550	0,651

* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$

Nota: Desviación estándar de los coeficientes en paréntesis. La variable *Pudahuel_post* corresponde a una dummy que se activa cuando el dato corresponde a la estación de monitoreo Pudahuel y además se mide después de la fecha del experimento natural (12 de enero de 2010). Los controles meteorológicos corresponden a dirección y velocidad del viento, nivel de precipitación promedio (también con un rezago) y la temperatura promedio. La variable IMACEC ha sido interpolada de forma diaria entre meses para que corresponda con los periodos diarios de los datos. Este ejercicio no presenta diferencias significativas entre estimar con interpolación o sin ella. Los 3 modelos han sido estimados con errores clusterizados por centro de medición, por lo que son consistentes ante esta especificación.

En el Cuadro 4 se presenta una regresión similar a la ecuación principal (1), pero en este caso la variable dependiente es el nivel de ozono (O_3) medido en partes por billón (ppb). Se puede observar que solamente el Modelo1 muestra un coeficiente significativo con respecto el efecto de la extensión de la Línea 5 en el nivel de Ozono, mientras que tanto el Modelo2 como el Modelo3 no presentan resultados estadísticamente significativos. Basándonos en el Modelo3, este resultado respalda la hipótesis y el canal de efecto planteado ya que no hay un cambio significativo en los contaminantes que no están relacionados con la combustión de los motores de los vehículos particulares.

9. Conclusión

La contaminación ambiental a nivel mundial y en Santiago de Chile ha alcanzado niveles preocupantes tanto por los efectos negativos que las partículas contaminantes, como el $MP_{2,5}$, pueden tener en la salud de las personas, como en el equilibrio del planeta. Por esta razón, es crucial tomar medidas que ayuden a reducir los niveles de contaminación en el ambiente.

En este trabajo analizó el efecto que tuvo la extensión de la Línea 5 del Metro (desde la estación Gruta de Lourdes hasta la estación Pudahuel) en el nivel de $MP_{2,5}$. Se utilizó una estrategia de identificación de diferencias en diferencias, y se llega a la conclusión de que esta extensión de la red de Metro en la ciudad de Santiago implicó una disminución promedio de $3,210 \frac{\mu g}{m^3}$, lo que corresponde a un 11,6% menos en este contaminante en la estación de monitoreo de Pudahuel.

A partir de estos resultados, se sugiere que el Estado participe y promueva activamente inversiones que aceleren la utilización y la oferta de medios de transporte públicos eficientes en la utilización de energías limpias. También es esencial que la empresa Metro y el Ministerio de Transporte planifiquen racionalmente las extensiones de las futuras líneas de Metro para satisfacer la demanda de transporte público de la ciudadanía y así contribuir a la reducción de los niveles de contaminación ambiental en Santiago. Esto debido a que, en base a los resultados de esta investigación, la extensión de la red de Metro disminuye los niveles de contaminación ambiental, en particular, de $MP_{2,5}$.

Una de las limitantes de este trabajo fue la imposibilidad de incluir una variable que mida el nivel diario de congestión vehicular de la ciudad, característica clave que afecta a la contaminación ambiental, en especial en la ciudad de Santiago debido a que la ubicación geográfica entre dos cordilleras genera una especie de cápsula que no permite que estos contaminantes puedan escapar.

Además, para investigaciones futuras, parece de interés incluir otras variables relevantes que pudiesen afectar al nivel de contaminación ambiental, como los niveles de impuesto a los combustibles más contaminantes y el fenómeno de la inversión térmica, que afecta la circulación del aire en la cuenca de la Región Metropolitana de Santiago.

Finalmente, en cuanto a la metodología, sería interesante incluir un modelo de diferencias en diferencias espacial, tal como la investigación de Xiao et al (2020). Esto sería útil para despejar el sesgo que podría implicar el hecho de que la contaminación medida en un centro de medición puede expandirse hacia otros centros.

Referencias

Anderson, M. L. (2014). Subways, strikes, and slowdowns: The impacts of public transit on traffic congestion. *American Economic Review*, 104(9), 2763-96.

Beaudoin, J., & Lin Lawell, C. Y. C. (2016). Is public transit's "green" reputation deserved?: Evaluating the effects of transit supply on air quality. University of California at Davis Working Paper.

Bharadwaj, P., Gibson, M., Zivin, J. G., & Neilson, C. (2017). Gray matters: Fetal pollution exposure and human capital formation. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 4(2), 505-542.

Chetty, R., Friedman, J. N., Hilger, N., Saez, E., Schanzenbach, D. W., & Yagan, D. (2011). How does your kindergarten classroom affect your earnings? Evidence from Project STAR. *The Quarterly journal of economics*, 126(4), 1593-1660.

Currie, J., & Thomas, D. (2001). Early test scores, school quality and SES: Longrun effects on wage and employment outcomes. In *Worker wellbeing in a changing labor market*. Emerald Group Publishing Limited.

Dictuc. (2007). Actualización del Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos en la Región Metropolitana, Informe Final, 15 de mayo, Comisión Nacional del Medio Ambiente, Región Metropolitana.

DTP. (2020). Informe de gestión DTPM. Dirección de Transporte Público Metropolitano.

Figueroa, E., Gómez-Lobo, A., Jorquera, P. & Labrín, F. (2013). Estimating the environmental impacts of a public transit reform: the case of Transantiago in Chile; *Estudios de Economía* 40(1): 53-79.

Gallego, F., Montero, J. P., & Salas, C. (2013). The effect of transport policies on car use: Evidence from Latin American cities. *Journal of Public Economics*, 107, 47-62.

Goel, D., & Gupta, S. (2014). The effect of Metro rail on air pollution in Delhi. Centre for Development Economics.

IPCC (2023). Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6); Summary for Policymakers; Synthesis Report. 20 March 2023. Interlaken, Switzerland, March 20, 2023.

Kappos, A. D., Bruckmann, P., Eikmann, T., Englert, N., Heinrich, U., Höpfe, P., ... & Wichmann, H. E. (2004). Health effects of particles in ambient air. *International journal of hygiene and environmental health*, 207(4), 399-407.

Levy, J. I., Buonocore, J. J., & Von Stackelberg, K. (2010). Evaluation of the public health impacts of traffic congestion: a health risk assessment. *Environmental health*, 9(1), 1-12.

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

MMA-Chile. (2017). Contaminación atmosférica se mantiene como el principal problema ambiental del país y el uso de leña aparece como la actividad más dañina para el aire. Ministerio del Medio Ambiente de Chile.

Mohring, H. (1972). Optimization and scale economies in urban bus transportation. *The American Economic Review*, 62(4), 591-604.

OMS. (2013). Health effects of particulate matter. Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia.

Pui, D. Y., Chen, S. C., & Zuo, Z. (2014). PM_{2.5} in China: Measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation. *Particuology*, 13, 1-26.

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

Topalovic, P., Carter, J., Topalovic, M., & Krantzberg, G. (2012). Light rail transit in Hamilton: Health, environmental and economic impact analysis. *Social Indicators Research*, 108(2), 329-350.

Union of Concerned Scientists. (2018). Cars, trucks, buses and air pollution.

U. de Chile. (2021). Especialistas U. de Chile alertan sobre los peligros de la contaminación atmosférica en la salud. Universidad de Chile.

USEPA. (2009b). Integrated science assessment for particulate matter (final report).

EPA/600/R-08/139F. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.

Vickrey, W. S. (1969). Congestion theory and transport investment. *The American Economic Review*, 59(2), 251-260.

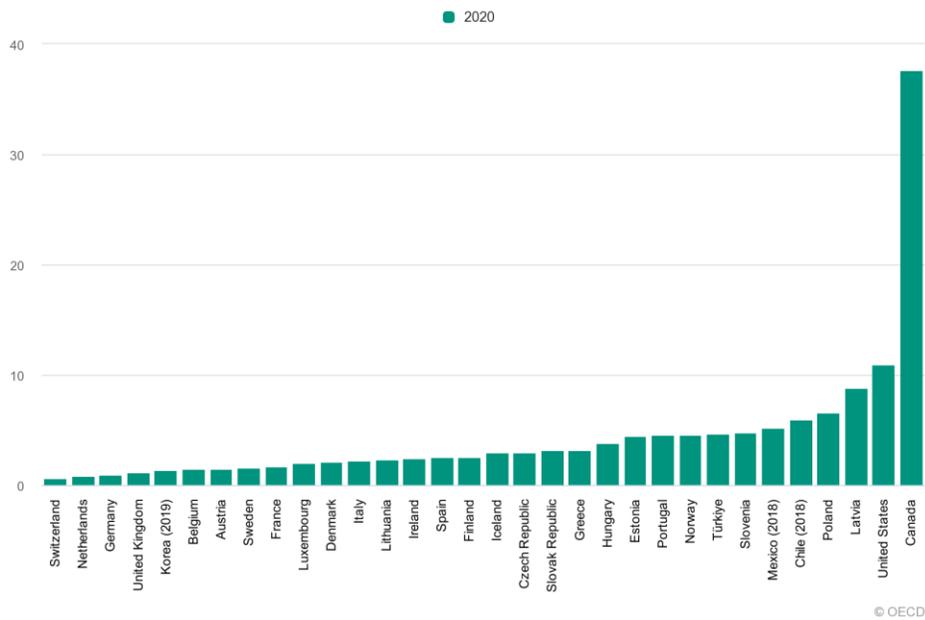
Williams, M. L. (1987). The impact of motor vehicles on air pollutant emissions and air quality in the UK—an overview. *Science of the Total Environment*, 59, 47-61.

Xiao, D., Li, B., & Cheng, S. (2020). The effect of subway development on air pollution: evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, 275, 124149.

Zheng, S., Zhang, X., Sun, W., & Wang, J. (2019). The effect of a new subway line on local air quality: A case study in Changsha. *Transportation research part D: transport and environment*, 68, 26-38.

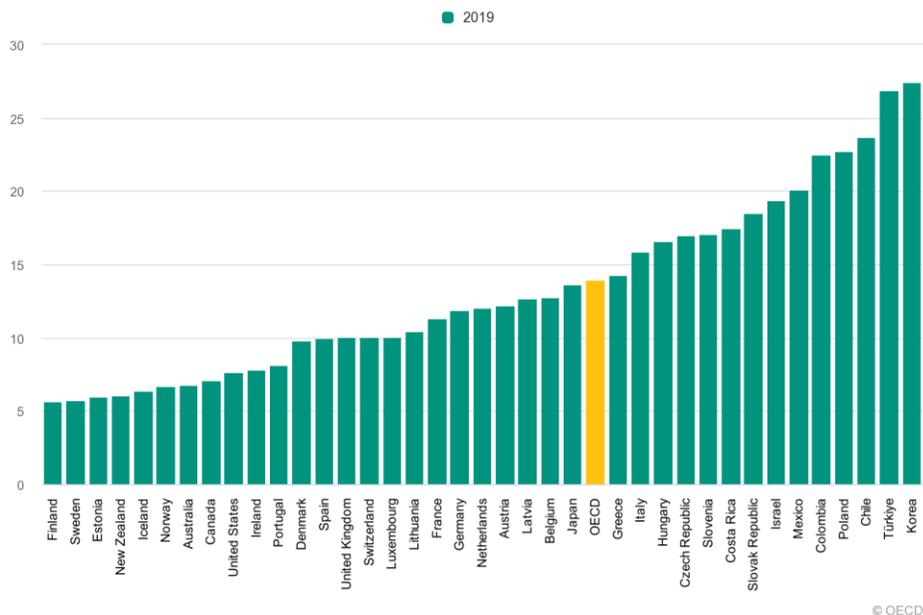
Anexos

Figura 2: Emisiones per cápita de Material Particulado 2,5 (kg per cápita)



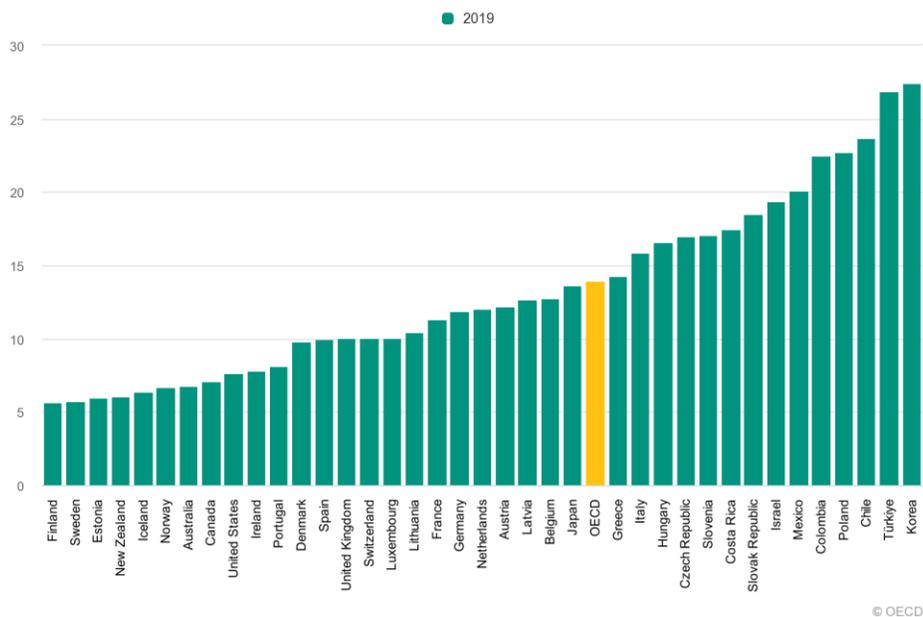
Fuente: OECD, Air and climate: Air emissions by source, OECD Environments Statistics (database)

Figura 3: Promedio de la exposición al Material Particulado 2,5 (microgramos por metro cúbico)



Fuente: OECD, Air quality and health: Exposure to PM 2.5 fine particles – countries and regions, OECD Environments Statistics (database)

Figura 4: Porcentaje de la población que excede el nivel de exposición sugerido por la OMS de material particulado 2,5



Fuente: OECD, Air quality and health: Exposure to PM 2.5 fine particles – countries and regions, OECD Environments Statistics (database)

Cuadro 5: Resultados regresión diferencias en diferencias por especificación

	Modelo1	Modelo2	Modelo3
	MP _{2,5} ($\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$)	MP _{2,5} ($\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$)	MP _{2,5} ($\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$)
Pudahuel	3,765**	9,608**	3,764**
	(1,15)	(1,44)	(1,53)
Post	-3,203*	5,136	-2,421
	(1,27)	(3,26)	(1,35)
Pudahuel_post	-1,638	-7,653*	-3,210*
	(1,27)	(3,14)	(1,44)
Dirección		-0,039***	-0,023
		(0,01)	(0,03)
Precipitación		-0,440***	-0,522***
		(0,05)	(0,07)
L_Precipitación		-0,812***	-0,855***
		(0,08)	(0,09)
Temperatura		-0,833***	0,225
		(0,11)	(0,12)
Velocidad		-4,203	-2,635
		(3,34)	(1,60)
L_Alerta		38,374***	29,780***
		(3,25)	(3,60)
L_Preemergencia		62,738***	52,715***
		(3,16)	(4,08)
L_Emergencia		60,469***	48,876***
		(3,53)	(5,22)
IMACEC		-0,117	0,051
		(0,06)	(0,04)
Efectos fijos estación de monitoreo			X
Efectos fijos temporales			X
Constante	28,851***	59,304***	23,095*
	(1,15)	(11,67)	(9,72)
N	21.580	13.223	13.223
R²	0,022	0,323	0,504

*p<0,05, **p<0,01, ***p<0,001

Nota: Desviación estándar de los coeficientes en paréntesis. La variable *Pudahuel_post* corresponde a una dummy que se activa cuando el dato corresponde a la estación de monitoreo Pudahuel y además se mide después de la fecha del experimento natural (12 de enero de 2010). Los controles meteorológicos corresponden a dirección y velocidad del viento, nivel de precipitación promedio (también con un rezago) y la temperatura promedio. La variable IMACEC ha sido interpolada de forma diaria entre meses para que corresponda con los periodos diarios de los datos. Este ejercicio no presenta diferencias significativas entre estimar con interpolación o sin ella. Los 3 modelos han sido estimados con errores clusterizados por centro de medición, por lo que son consistentes ante esta especificación.