



Universitat Autònoma de Barcelona

**ADVERTIMENT.** L'accés als continguts d'aquesta tesi queda condicionat a l'acceptació de les condicions d'ús establertes per la següent llicència Creative Commons:  [http://cat.creativecommons.org/?page\\_id=184](http://cat.creativecommons.org/?page_id=184)

**ADVERTENCIA.** El acceso a los contenidos de esta tesis queda condicionado a la aceptación de las condiciones de uso establecidas por la siguiente licencia Creative Commons:  <http://es.creativecommons.org/blog/licencias/>

**WARNING.** The access to the contents of this doctoral thesis it is limited to the acceptance of the use conditions set by the following Creative Commons license:  <https://creativecommons.org/licenses/?lang=en>



Universitat Autònoma de Barcelona

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BARCELONA**

DEPARTAMENTO DE PEDIATRÍA, OBSTETRICIA Y GINECOLOGÍA Y DE  
MEDICINA PREVENTIVA Y SALUD PÚBLICA  
PROGRAMA DE DOCTORADO: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN  
BIOMÉDICA Y SALUD PÚBLICA

**IMPACTO DE LA INTRODUCCIÓN DE LA REFORMA AL  
TRANSPORTE PÚBLICO “TRANSANTIAGO” EN LA CALIDAD DEL  
AIRE DE SANTIAGO, CHILE**

**TESIS DOCTORAL**

Karla Yohannessen Vásquez

Director:

Dr. Sergio Alvarado Orellana

Tutor:

Dr. Albert Navarro Giné

**BARCELONA 2020**



*A mis padres, Blanca y Enrique.  
A mi niño travieso, Aníbal Benjamín.*



## Agradecimientos

*En primer lugar, agradezco a Dios y mi familia por acompañarme durante todas las etapas de la vida, especialmente en mis etapas de formación y por inculcarme el espíritu de superación constante. También agradezco toda la ayuda, la paciencia y el apoyo incondicional durante todos estos años, donde la vida con sus altos y bajos no se detiene mientras desarrollas el doctorado... sin ustedes no hubiera sido posible.*

*A mi director de tesis, Sergio Alvarado que ha sabido orientarme y enseñarme a reflexionar sobre los métodos estadísticos más allá de su cálculo e interpretación. Gracias por su apoyo, consejos y paciencia a lo largo del desarrollo de la tesis.*

*A mis amigas y amigos que también han sido un pilar fundamental en este proceso, en especial a Pía, quien ha sabido empujarme cuando he bajado el ritmo hasta detenerme y por alentarme cada vez que terminé un capítulo.*

*A mi tutor, Albert Navarro, quien ha sido mi nexa con la UAB y quien me ha orientado en los procesos universitarios y ayudado recordando los hitos del doctorado cada año.*

*A todos quienes dedicaron un tiempo de sus vidas para leer y escuchar sobre este trabajo, entregando sus aportes y comentarios, enriqueciendo su contenido.*

## Resumen

**Antecedentes:** La contaminación atmosférica en Santiago, capital de Chile, ha sido una permanente preocupación en los últimos 30 años, tanto para el gobierno como para la población. Una importante medida enfocada a reducir los niveles de contaminación fue la reforma al transporte público, llamada Transantiago (TS), implementada radicalmente el 10 de febrero de 2007.

**Objetivos:** Evaluar el impacto de la introducción de la reforma al transporte público en la calidad del aire en Santiago y comparar los resultados entre zonas geográficas según variables de contexto social.

**Métodos:** Estudio ecológico mixto. Se utilizaron registros de las concentraciones de contaminantes desde fuentes oficiales de gobierno (n=8 estaciones de monitoreo) y registros de variables meteorológicas y de contexto social. Se describen las concentraciones diarias y el cumplimiento de las normativas nacionales para los contaminantes MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub>, O<sub>3</sub> y CO considerando el período previo (2001-2006) y posterior (2008-2013) a la implementación. El impacto de la implementación de TS se evaluó a través de un análisis de Serie de Tiempo Interrumpida (STI), considerando las concentraciones mensuales para el período 2001-2013. Los resultados de los indicadores de calidad del aire y del modelo STI se compararon entre zonas geográficas de manera descriptiva y a través de test de Kruskal Wallis. Se calculó el índice de concentración (IC) para evaluar la desigualdad en la distribución de los indicadores a través del Índice de Prioridad Social (IPS).

**Resultados:** las medianas de concentraciones diarias de MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub> y O<sub>3</sub> fueron menores en el período posterior a TS comparado con el período previo, en todas las estaciones de monitoreo; las concentraciones de CO mostraron menores valores posterior a TS solo en 4 estaciones. La normativa anual para los contaminantes MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> fue superada por todas las estaciones de monitoreo en todo el período de estudio. El número de superaciones de la normativa diaria posterior a TS disminuyó en todas las estaciones. En el análisis STI, las concentraciones de MP<sub>2,5</sub> mostraron una tendencia a la reducción posterior a TS en todas las estaciones (0,08-0,17 µg/m<sup>3</sup> mensual), mientras que en las concentraciones de CO el impacto encontrado mostró una tendencia al aumento posterior a TS (0,003-0,031 ppm mensual). El impacto en las concentraciones de MP<sub>10</sub>, mostró una tendencia a la reducción de las concentraciones en 4 estaciones, y las concentraciones de O<sub>3</sub> mostraron una tendencia a la disminución en 6 estaciones. Las concentraciones diarias de los contaminantes estudiados y los coeficientes del modelo STI mostraron una distribución heterogénea entre las comunas donde se ubican las estaciones de monitoreo sin mostrar un gradiente relacionado con su IPS. Se encontró una distribución desigual marcada para los días con calidad del aire no saludable por MP<sub>10</sub> (IC≈-0,50) en ambos períodos, y un aumento de la desigualdad en la distribución de los días con calidad del aire no saludable por MP<sub>2,5</sub> en el período posterior a la introducción de TS (IC<sub>2001-2006</sub>=-0,24 versus IC<sub>2008-2013</sub>=-0,43).

**Conclusiones:** La implementación de TS tuvo un impacto en reducir la tendencia de las concentraciones de  $MP_{2,5}$ , no obstante, se observó un aumento en la tendencia de las concentraciones de CO. La magnitud del impacto en los indicadores de calidad del aire considerados fue heterogénea entre las estaciones de monitoreo y fue desigual para los días de calidad del aire no saludable.

**Palabras clave:** Calidad del aire, Transporte público, Intervención, Desigualdades



## Resum

**Antecedents:** La contaminació atmosfèrica a Santiago, capital de Chile, ha estat una permanent preocupació en els últims 30 anys, tant per al govern com per a la població. Una important mesura enfocada a reduir els nivells de contaminació va ser la reforma del transport públic, anomenada Transantiago (TS), implementada radicalment el 10 de febrer del 2007.

**Objectius:** Avaluar l'impacte de la introducció de la reforma del transport públic sobre la qualitat de l'aire a Santiago i comparar els resultats entre zones geogràfiques segons variables de context social.

**Mètodes:** Estudi ecològic mixt. Es van utilitzar registres de les concentracions de contaminants a partir de fonts oficials del govern (n=8 estacions de monitorització), registres de variables meteorològiques i de context social. Es descriuen les concentracions diàries i el compliment de les normatives nacionals per als contaminants MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub>, O<sub>3</sub> i CO considerant el període previ (2001-2006) i posterior (2008-2013) a la implementació. L'impacte de la implementació del TS es va avaluar mitjançant una anàlisi de Sèrie de Temps Interrompuda (STI), considerant les concentracions mensuals per al període 2001-2013. Els resultats dels indicadors de qualitat de l'aire i de el model STI es van comparar entre zones geogràfiques de manera descriptiva i mitjançant test de Kruskal Wallis. Es va calcular l'índex de concentració (IC) per avaluar la desigualtat en la distribució dels indicadors a través de l'Índex de Prioritat Social (IPS).

**Resultats:** Les medianes de concentracions diàries de MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub> i O<sub>3</sub> van ser menors en el període posterior a TS comparat amb el període previ, en totes les estacions de monitorització; les concentracions de CO van mostrar menors valors posterior a TS només en 4 estacions. La normativa anual per als contaminants MP<sub>10</sub> i MP<sub>2,5</sub> va ser superada per totes les estacions de monitorització en tot el període d'estudi. El nombre de superacions de la normativa diària posterior a TS va disminuir en totes les estacions. En l'anàlisi STI, les concentracions de MP<sub>2,5</sub> van mostrar una tendència a la reducció posterior a TS en totes les estacions (0,08-0,17 mg/m<sup>3</sup> mensual), mentre que en les concentracions de CO l'impacte trobat va mostrar una tendència a l'augment posterior a TS (0,003-0,031 ppm mensual). L'impacte en les concentracions de MP<sub>10</sub>, va mostrar una tendència a la reducció de les concentracions en 4 estacions, i les concentracions d'O<sub>3</sub> van mostrar una tendència a la disminució en 6 estacions. Les concentracions diàries dels contaminants estudiats i els coeficients de el model STI van mostrar una distribució heterogènia entre les comunes on s'ubiquen les estacions de monitorització sense mostrar un gradient relacionat amb la seva IPS. Es va trobar una distribució desigual marcada per als dies amb qualitat de l'aire no saludable per MP<sub>10</sub> (IC<sub>2001-2006</sub> ≈ -0,50) en els dos períodes, i un augment de la desigualtat en la distribució dels dies amb qualitat de l'aire no saludable per MP<sub>2,5</sub> en el període posterior a la introducció de TS (IC<sub>2001-2006</sub> = -0,24 versus IC<sub>2008-2013</sub> = -0,43).

**Conclusions:** La implementació de TS va tenir un impacte en reduir la tendència de les concentracions de MP<sub>2,5</sub>, però malgrat això, es va observar un augment en la tendència de les concentracions de CO. La magnitud de l'impacte en els indicadors de qualitat de l'aire considerats va ser heterogènia entre les estacions de monitorització i va ser desigual per als dies de qualitat de l'aire no saludable.

**Paraules clau:** Qualitat de l'aire, Transport públic, Intervenció, Desigualtats

## Abstract

**Background:** Air pollution in Santiago, capital of Chile, has been a permanent concern in the last 30 years, for the government as well as for the population. An important measure aimed at reducing pollution levels was the reform to public transport, called Transantiago (TS), radically implemented on February 10, 2007.

**Objectives:** Evaluate the impact of the introduction of the public transport reform on air quality in Santiago and compare the results between geographical areas according to variables of social context.

**Methods:** Mixed ecological study. Records of pollutant concentrations from official government sources (n=8 monitoring stations) and records of meteorological variables and social context were used. Daily concentrations and compliance with national regulations for pollutants PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, O<sub>3</sub> and CO are described, considering the period before (2001-2006) and after (2008-2013) implementation. The impact of TS implementation was evaluated through an Interrupted Time Series (STI) analysis, considering the monthly concentrations for the period 2001-2013. The results of the air quality indicators and the STI model were compared between geographical areas in a descriptive way and through the Kruskal Wallis test. The concentration index (CI) was calculated to evaluate the inequality in the distribution of the indicators through the Social Priority Index (SPI).

**Results:** the medians of daily concentrations of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> were lower in the period after TS compared to the previous period, in all monitoring stations; CO concentrations showed lower values after TS only in 4 stations. The annual regulations for pollutants PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> were exceeded by all monitoring stations throughout the study period. The number of exceedances of the daily regulation after TS decreased in all stations. In the STI analysis, PM<sub>2.5</sub> concentrations showed a tendency to decrease after TS in all stations (0.08-0.17 µg/m<sup>3</sup> per month), while in CO concentrations the impact found showed an upward trend after TS (0.003-0.031 ppm monthly). The impact on PM<sub>10</sub> concentrations showed a tendency to decrease concentrations in 4 stations, and O<sub>3</sub> concentrations showed a decrease tendency in 6 stations. The daily concentrations of the pollutants studied and the coefficients of the STI model showed a heterogeneous distribution among the communes where the monitoring stations are located without showing a gradient related to their SPI. A strong unequal distribution was found for days with unhealthy air quality by PM<sub>10</sub> (CI<sub>2001-2006</sub> ≈ -0.50) in both periods, and an increase in inequality in the distribution of days with unhealthy air quality by PM<sub>2.5</sub> in the period after the introduction of ST (CI<sub>2001-2006</sub> = -0.24 versus CI<sub>2008-2013</sub> = -0.43).

**Conclusions:** The implementation of TS had an impact on reducing the trend of PM<sub>2.5</sub> concentrations, however, an increase in the trend of CO concentrations was observed. The magnitude of the impact on the air quality indicators considered was heterogeneous among the monitoring stations and was unequal for the days of unhealthy air quality.

**Keywords:** Air quality, Public transport, Intervention, Inequalities

## Abreviaturas y acrónimos

<b>AED</b>	Análisis Exploratorio de los Datos
<b>AVAD</b>	Años de Vida Ajustados por Discapacidad
<b>AVPP</b>	Años de Vida Potenciales Perdidos (AVPP)
<b>BO</b>	El Bosque
<b>Br</b>	Bromo
<b>CE</b>	Cerrillos
<b>CN</b>	Cerro Navia
<b>CO</b>	Monóxido de Carbono
<b>Cr</b>	Cromo
<b>EMRP</b>	Estación de Monitoreo con Representatividad Poblacional
<b>EPA</b>	Agencia de Protección Ambiental (Estados Unidos)
<b>Fe</b>	Fierro
<b>GCA</b>	Guías de Calidad del Aire
<b>IC</b>	Índice de Concentración
<b>IN</b>	Independencia
<b>IPS</b>	Índice de Prioridad Social
<b>K</b>	Potasio
<b>LC</b>	Las Condes
<b>LF</b>	La Florida
<b>MCO</b>	Mínimos Cuadrados Ordinarios
<b>MP</b>	Material particulado
<b>MP<sub>10</sub></b>	Material particulado <10 micrómetros
<b>MP<sub>2,5</sub></b>	Material particulado <2,5 micrómetros
<b>Ni</b>	Níquel
<b>NO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Nitrógeno
<b>O<sub>3</sub></b>	Ozono
<b>OE</b>	Objetivo Específico
<b>OMS</b>	Organización Mundial de la Salud
<b>Pb</b>	Plomo
<b>PO</b>	Parque O'Higgins
<b>PPDA</b>	Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica
<b>PU</b>	Pudahuel
<b>S</b>	Azufre
<b>SECTRA</b>	Secretaría de Planificación del Transporte
<b>SINCA</b>	Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire
<b>SO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Azufre
<b>STI</b>	Serie Temporal Interrumpida
<b>TS</b>	Transantiago

## Índice de contenidos

Agradecimientos.....	5
Resumen.....	6
Resum.....	8
Abstract.....	10
Abreviaturas y acrónimos.....	11
1. Introducción.....	19
2. Contaminación del aire en Santiago, Chile.....	22
2.1. Efectos en salud y carga de enfermedad atribuible a la exposición a contaminación del aire.....	23
2.2. Normas de calidad del aire en Chile y vigilancia ambiental.....	25
2.3. Políticas públicas enfocadas en la reducción de la contaminación del aire en Santiago, Chile.....	29
3. Reforma al transporte público y estudios de evaluación del impacto en la calidad del aire.....	31
3.1. Evaluación del impacto del TS en la calidad del aire.....	34
4. Uso de Series de Tiempo Interrumpidas para evaluar el impacto de una intervención.....	39
5. Evaluación de la distribución del impacto de intervenciones con enfoque de equidad.....	46
6. Preguntas de investigación e hipótesis.....	52
6.1. Preguntas de investigación.....	52
6.2. Hipótesis.....	52
7. Objetivos.....	53
7.1. Objetivo General.....	53
7.2. Objetivos Específicos.....	53
8. Métodos.....	54

8.1. Diseño de estudio.....	54
8.2. Variables y fuentes de información .....	54
8.3. Plan de análisis .....	57
9. Resultados.....	69
9.1. Análisis Exploratorio de Datos previo al cumplimiento de objetivos .....	69
9.2. OE 1. Describir las concentraciones de contaminantes y variables meteorológicas en Santiago durante el período previo y posterior a la introducción de la reforma al transporte público (TS).....	89
9.3. OE 2. Estimar el impacto de la introducción de la reforma al transporte público (TS) en la calidad del aire en Santiago, Chile .....	106
9.4. OE 3. Comparar los indicadores de calidad del aire y el impacto de TS entre zonas de Santiago, Chile según factores de estratificación social.....	126
10. Discusión .....	151
11. Conclusiones .....	165
12. Referencias .....	167
13. Anexos .....	177

## Índice de tablas

Tabla 1. Estándares de calidad de aire y valores recomendados por la OMS para contaminantes criterio. ....	26
Tabla 2. Descripción de los tipos de contaminantes medidos en las estaciones de monitoreo y representatividad poblacional. ....	28
Tabla 3. Contaminantes disponibles en las estaciones de monitoreo, fuente de información y características de la medición. ....	55
Tabla 4. Variables meteorológicas disponibles, fuente de información y características de la medición. ....	55
Tabla 5. Indicadores y variables de contexto social disponibles, fuente de información y año de medición. ....	56
Tabla 6. Aspectos sugeridos por López-Bernal et al. para la utilización de un análisis de STI y su descripción en relación con la evaluación del impacto de la implementación del TS sobre las concentraciones de contaminantes. ....	61
Tabla 7. Porcentajes de completitud anual de los datos de concentraciones horarias de MP <sub>10</sub> y MP <sub>2,5</sub> según estación de monitoreo. ....	71
Tabla 8. Porcentajes de completitud anual de los datos de concentraciones horarias de los gases NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> y CO según estación de monitoreo. ....	72
Tabla 9. Mediana y rango intercuartil de las concentraciones horarias observadas de todos los contaminantes según estación de monitoreo. ....	77
Tabla 10. Mediana y rango intercuartil de las concentraciones diarias observadas de todos los contaminantes según estación de monitoreo. ....	85
Tabla 11. Correlación de Pearson entre las medias diarias observadas e imputadas para los contaminantes MP <sub>10</sub> , MP <sub>2,5</sub> , CO y O <sub>3</sub> . ....	86
Tabla 12. Mediana y rango intercuartil de las concentraciones diarias imputadas de todos los contaminantes según estación de monitoreo. ....	87
Tabla 13. Estadísticas descriptivas de las concentraciones medias diarias de contaminantes, variables meteorológicas y superaciones de normativa diaria y comparación entre el período previo y posterior a la introducción de TS en todas las estaciones de monitoreo. ....	90

Tabla 14. Estadísticas descriptivas de las concentraciones medias diarias de contaminantes MP <sub>10</sub> y MP <sub>2,5</sub> y comparación entre el período previo y posterior a la introducción de TS según estación de monitoreo.....	91
Tabla 15. Estadísticas descriptivas de las concentraciones medias diarias de contaminantes CO y O <sub>3</sub> y comparación entre el período previo y posterior a la introducción de TS según estación de monitoreo.....	93
Tabla 16. Comparación del número de superaciones (n) del estándar diario chileno de MP <sub>10</sub> y MP <sub>2,5</sub> , entre el período previo y posterior a la introducción de TS según estación de monitoreo. ....	94
Tabla 17. Estadísticas descriptivas de las medias mensuales de los contaminantes MP <sub>10</sub> , MP <sub>2,5</sub> , O <sub>3</sub> y CO y comparación entre el período previo y posterior a la intervención (TS). ....	108
Tabla 18. Estadísticas descriptivas de las medias mensuales de las variables climáticas y comparación entre el período previo y posterior a la intervención (TS). ....	115
Tabla 19. Coeficientes estimados de los modelos basales y ajustados de STI para las medias mensuales de MP <sub>10</sub> , MP <sub>2,5</sub> , O <sub>3</sub> y CO. ....	119
Tabla 20. Descripción de los indicadores y variables de contexto social según comuna de ubicación de la estación de monitoreo.....	128
Tabla 21. Descripción de algunos indicadores ambientales de según comuna de ubicación de la estación de monitoreo. ....	129
Tabla 22. Días de calidad del aire saludable para MP <sub>10</sub> y MP <sub>2,5</sub> , en el período previo y posterior a la introducción de TS según estación de monitoreo. ....	139



## Índice de figuras

Figura 1. Imagen satelital de la cuenca de Santiago, Chile.....	22
Figura 2. Mapa de Santiago y la red de estaciones de monitoreo según período de mediciones disponibles. ....	27
Figura 3. Características del sistema de transporte público antiguo y Transantiago. ....	33
Figura 4. Distribución espacial de las estaciones de monitoreo incluidas en el estudio.....	70
Figura 5. Variación según hora del día de las concentraciones horarias observadas de MP <sub>10</sub> y MP <sub>2,5</sub> según temporada del año. ....	74
Figura 6. Variación según hora del día de las concentraciones horarias observadas de CO, O <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub> según temporada del año.....	76
Figura 7. Variaciones semanales de la distribución de las concentraciones diarias observadas de MP <sub>10</sub> y MP <sub>2,5</sub> según temporada.....	78
Figura 8. Variaciones semanales de la distribución de las concentraciones diarias observadas de CO, O <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub> según temporada. ....	80
Figura 9. Variaciones mensuales de la distribución de las concentraciones diarias observadas.....	82
Figura 10. Variaciones anuales de la distribución de las concentraciones diarias observadas.....	84
Figura 11. Concentraciones anuales de MP <sub>10</sub> durante el período de estudio según estación de monitoreo. ....	96
Figura 12. Concentraciones anuales de MP <sub>2,5</sub> durante el período de estudio según estación de monitoreo. ....	97
Figura 13. Serie de tiempo de las concentraciones medias diarias de MP <sub>10</sub> según estación de monitoreo. ....	99
Figura 14. Serie de tiempo de las concentraciones medias diarias de MP <sub>2,5</sub> según estación de monitoreo. ....	100
Figura 15. Serie de tiempo de las concentraciones medias diarias de O <sub>3</sub> según estación de monitoreo. ....	102
Figura 16. Serie de tiempo de las concentraciones medias diarias de CO según estación de monitoreo. ....	103

Figura 17. Gráficos de dispersión de las medias mensuales de MP <sub>10</sub> según estaciones de monitoreo, 2001-2013. ....	109
Figura 18. Gráficos de dispersión de las medias mensuales de MP <sub>2,5</sub> según estaciones de monitoreo, 2001-2013. ....	110
Figura 19. Gráficos de dispersión de las medias mensuales de O <sub>3</sub> según estaciones de monitoreo, 2001-2013. ....	111
Figura 20. Gráficos de dispersión de las medias mensuales de CO según estaciones de monitoreo, 2001-2013. ....	112
Figura 21. Gráficos del modelo ajustado de STI para las medias mensuales de MP <sub>10</sub> según estaciones de monitoreo, 2001-2013.....	120
Figura 22. Gráficos del modelo ajustado de STI para las medias mensuales de MP <sub>2,5</sub> según estaciones de monitoreo, 2001-2013.....	121
Figura 23. Gráficos del modelo ajustado de STI para las medias mensuales de O <sub>3</sub> según estaciones de monitoreo, 2001-2013.....	122
Figura 24. Gráficos del modelo ajustado de STI para las medias mensuales de CO según estaciones de monitoreo, 2001-2013.....	123
Figura 25. Tasa de motorización (vehículos/habitante) entre los años 2002 y 2012, según comuna de ubicación de la estación de monitoreo. ....	130
Figura 26. Número total de empresas y proporción de empresas con fuentes fijas de emisión según comunas para los años 2005 y 2010.....	131
Figura 27. Concentraciones diarias de MP <sub>10</sub> pre y post intervención según el IPS comunal de las estaciones de monitoreo estudiadas. ....	133
Figura 28. Concentraciones diarias de MP <sub>2,5</sub> pre y post intervención según el IPS comunal de las estaciones de monitoreo estudiadas. ....	135
Figura 29. Curvas de concentración de las superaciones del estándar diario de MP <sub>10</sub> y MP <sub>2,5</sub> pre y post intervención según el IPS.....	138
Figura 30. Curvas de concentración de los días de calidad del aire saludable según recomendación de la OMS para MP <sub>10</sub> y MP <sub>2,5</sub> pre y post intervención según el IPS. ....	141
Figura 31. Coeficientes estimados del modelo STI para las concentraciones de MP <sub>10</sub> según el IPS comunal de las estaciones de monitoreo estudiadas. ....	143

Figura 32. Curva de concentración de la reducción en la tendencia post intervención de las concentraciones mensuales de $MP_{10}$ según el IPS. ....	144
Figura 33. Coeficientes estimados del modelo STI para las concentraciones de $MP_{2,5}$ según el IPS comunal de las estaciones de monitoreo estudiadas. ....	146
Figura 34. Curva de concentración de la reducción en la tendencia post intervención de las concentraciones mensuales de $MP_{2,5}$ según el IPS.....	147

## 1. Introducción

La contaminación atmosférica y la congestión vehicular han sido, y actualmente son, problemas graves de salud pública en muchas ciudades del mundo, en particular en las economías emergentes. Esto debido al constante aumento del uso del automóvil por sobre el uso del transporte público (Lopez 2012; Gallego, Montero, and Salas 2013). En las ciudades latinoamericanas estos problemas han sido enfrentados con diferentes políticas de transporte.

En la ciudad de Santiago, capital de Chile, la contaminación atmosférica en los últimos 30 años ha sido una permanente preocupación y una alta prioridad para el gobierno y la población. En 1996, Santiago fue declarado zona saturada para Material Particulado grueso (MP<sub>10</sub>), Ozono (O<sub>3</sub>), Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) y Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>), por lo cual 2 años después se aprobó el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana (PPDA) que sufrió modificaciones en 2003, 2009 y 2015, incluyendo actualmente el Material Particulado fino (MP<sub>2,5</sub>). El PPDA estableció medidas para la descontaminación en 2 sectores principales: Sector transportes y combustibles, y Sector industrial, comercial y residencial (Gobierno de Chile 2008; Jhun et al. 2013).

Una de las medidas más importantes en el sector transporte fue la reforma al sistema de transporte público, llamada "Transantiago" (TS), la cual se puso en marcha el 10 de febrero del año 2007 con una renovación completa del sistema de transporte público de la ciudad que generó una transformación radical en un solo día. Drásticamente, disminuyó de manera importante la cantidad de autobuses, con una renovación de la flota antigua por autobuses con estándar de emisiones Euro III o superior, además, se cambiaron los recorridos y la forma de pago, entre otras modificaciones. En un comienzo existieron innumerables problemas de diseño e implementación, algunos de los cuales se fueron resolviendo con ajustes posteriores. De todas formas, considerando lo anterior, era esperable un efecto directo del TS en la calidad del aire.

La reforma del transporte público ha sido estudiada por varios investigadores desde diferentes perspectivas, incluyendo aquellos que han evaluado su impacto en la calidad del aire, utilizando diferentes metodologías de evaluación y llegando a conclusiones diversas. Dichos estudios han reportado, en resumen, un impacto del TS en la calidad del aire hacia una reducción en los niveles de  $MP_{10}$  en el largo plazo, ningún efecto sobre los niveles de  $MP_{2,5}$  y  $NO_2$ , y hallazgos contradictorios para el Monóxido de Carbono (CO). No obstante, los estudios descritos han tenido diferencias metodológicas que los hacen poco comparables con respecto a los modelos utilizados, el número de estaciones de monitoreo de calidad del aire utilizadas y el período de medición, entre otras. Además, ninguno de los estudios se ha enfocado en analizar el impacto del TS entre las diferentes zonas geográficas de Santiago.

Por otro lado, existen diversas herramientas metodológicas que permiten evaluar el impacto de una intervención. Una de ellas es el análisis de Series Temporales Interrumpidas (STI), la cual es una valiosa herramienta para evaluar la efectividad de una intervención a nivel poblacional, en intervenciones de salud o políticas públicas de diversa índole que se han implementado en un momento del tiempo claramente definido. Puesto que, la reforma del transporte público “Transantiago”, se implementó de manera radical el 10 de febrero de 2007, se hace posible evaluar su impacto en la calidad del aire de Santiago utilizando este enfoque de análisis. Además, la disponibilidad y calidad de los datos de monitoreo ambiental recolectados a través del tiempo por fuentes oficiales del gobierno de Chile, que abarcan antes y después de la intervención, hacen posible la aplicación del análisis de STI, en especial si los aspectos metodológicos y potenciales limitaciones son abordados en el planteamiento de los métodos de la investigación y en el análisis.

Adicionalmente, los resultados del análisis de STI aplicado a diferentes zonas geográficas, pueden compararse según variables de contexto, como por ejemplo variables socioeconómicas, las cuales pueden ayudar a entender las variaciones de los resultados entre zonas e identificar desigualdades en el efecto de la intervención. La distribución del impacto del TS en la calidad del aire, no

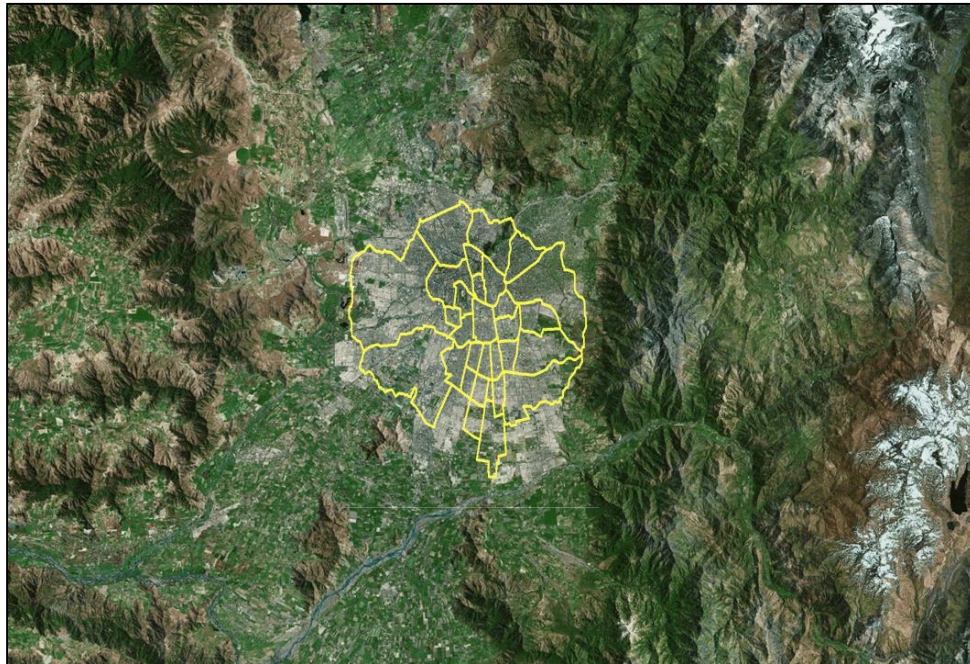
necesariamente tuvo que ser homogénea en toda la ciudad de Santiago, por lo que es esencial evaluar la heterogeneidad de estos impactos, y evaluar si existen diferencias en el efecto encontrado a través de variables socioeconómicas, para asegurarse de que los posibles beneficios de una intervención no contribuyan a generar o exacerbar las desigualdades existentes.

El objetivo de esta tesis es estimar el impacto de la implementación de la reforma al transporte público “Transantiago” en la calidad del aire de la ciudad de Santiago, Chile, mediante un enfoque de análisis de Serie de Tiempo Interrumpida, y evaluar si hubo un efecto diferencial entre zonas geográficas según variables de contexto social, con el propósito de identificar la existencia de desigualdades en el efecto de la intervención.

## 2. Contaminación del aire en Santiago, Chile

La ciudad de Santiago, capital de Chile, se encuentra rodeada por dos grandes cadenas montañosas, por el este se ubica la Cordillera de los Andes y por el oeste la Cordillera de la Costa (Jhun et al. 2013), formando una cuenca alrededor de la ciudad, tal como se muestra en la Figura 1. La ubicación geográfica de la cuenca de Santiago ( $33,5^{\circ}$  S,  $70,5^{\circ}$  O, 500 msnm) y sus condiciones de ventilación adversas determinan un escenario propicio para la acumulación de contaminantes, especialmente en invierno (Jorquera et al. 2004; Koutrakis et al. 2005; Barraza et al. 2017; Centro de Análisis de Políticas Públicas 2016).

**Figura 1. Imagen satelital de la cuenca de Santiago, Chile.**



Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, Santiago es la mayor área urbanizada de Chile y la séptima en América del Sur, está densamente poblado (~7 millones de habitantes) (Barraza et al. 2017; Centro de Análisis de Políticas Públicas 2016; Gallardo et al. 2018) y cuenta con un parque vehicular cercano a los 2 millones de vehículos motorizados (Jhun et al. 2013; Instituto Nacional de Estadísticas 2015). Además, Santiago y sus alrededores albergan diversas industrias mineras y agrícolas (70% del total) (Romero et al. 1999; Centro de Análisis de Políticas Públicas 2016).

La mayor fuente de contaminación en Santiago son los vehículos motorizados, seguida por la industria y la quema de madera residencial. Ambos tipos de fuentes de emisión, móviles y fijas, han contribuido significativamente a los problemas de contaminación del aire en esta ciudad (Gallardo et al. 2018). Como consecuencia de los elevados niveles de contaminación en la ciudad de Santiago, las comunidades expuestas se han visto afectadas con efectos adversos en su salud ya sea por exposición de corto o de largo plazo (Thurston et al. 2017).

## **2.1. Efectos en salud y carga de enfermedad atribuible a la exposición a contaminación del aire**

Estudios epidemiológicos realizados en Santiago, utilizando mediciones ambientales de contaminantes, han encontrado asociaciones significativas entre altas concentraciones de partículas o gases contaminantes con aumentos en: mortalidad diaria (Cakmak, Dales, and Blanco-Vidal 2007; Ostro et al. 1995; Sanhueza, Vargas, and Jiménez 1999; Cifuentes et al. 2000; Valdés et al. 2012; Cakmak et al. 2009a); hospitalizaciones diarias en general y por crisis respiratorias (Cakmak et al. 2009b), dolores de cabeza (Dales, Cakmak, and Blanco-Vidal 2009), crisis de epilepsia (Cakmak, Dales, and Blanco-Vidal 2010), trombosis venosa y embolia pulmonar (Dales, Cakmak, and Blanco-Vidal 2010); consultas en el departamento de emergencias en general (Cakmak et al. 2009b) y por síntomas respiratorios (Cakmak et al. 2009b; Ostro et al. 1999; Ilabaca et al. 1999); y en la exacerbación de síntomas respiratorios en niños (Prieto-Parra et al. 2017). La mayoría de estos estudios: (i) investigaron las fuentes de contaminación, concluyendo que las asociaciones eran mayores para las fuentes relacionadas con la combustión móvil (Cakmak et al. 2009a, 2009b; Cifuentes et al. 2000; Valdés et al. 2012; Prieto-Parra et al. 2017), (ii) investigaron los efectos diferenciados según estación del año, concluyendo que la fuerza de asociación era mayor en invierno (Prieto-Parra et al. 2017; Cakmak, Dales, and Blanco-Vidal 2007); y (iii) obtuvieron resultados consistentes y robustos al ajustar por las variables meteorológicas y circulación de virus (Prieto-Parra et al. 2017; Cakmak, Dales, and Blanco-Vidal 2007, 2010).



Los resultados descritos anteriormente son consistentes con los estudios realizados en otros países (Liu et al. 2018; Laurent et al. 2007; Li et al. 2012; Ab Manan, Noor Aizuddin, and Hod 2018), en los que además se ha reportado que los indicadores de morbilidad y mortalidad atribuibles a la contaminación del aire, han disminuido en zonas donde se implementaron estrategias o políticas para mejorar la calidad del aire (Künzli and Pérez 2007).

A nivel mundial se ha estimado que la carga global de enfermedad atribuida a la exposición a la contaminación del aire, específicamente Material Particulado fino (MP<sub>2,5</sub>), ha sido de 4,2 millones de muertes y 103,1 millones de años de vida ajustados por discapacidad (AVAD) en el año 2015, lo cual representa el 7,6% y el 4,2% del total de muertes y AVAD mundiales, respectivamente (Cohen et al. 2017; Babatola 2018). Esta carga de enfermedad reportada, ha aumentado progresivamente desde comienzos de los años noventa debido al envejecimiento de la población, los cambios en las tasas de enfermedades no transmisibles y el aumento de la contaminación del aire en los países de ingresos bajos y medios (Cohen et al. 2017).

Por otro lado, para los contaminantes Material Particulado (MP) y Ozono (O<sub>3</sub>), que han sido ampliamente estudiados, no se ha reportado un umbral de exposición por debajo del cual los impactos sobre la salud de la población estén ausentes, es decir, concentraciones de contaminantes cuya exposición sea inocua para la salud (Chan and Danzon 2005; Giles et al. 2011).

A pesar de que el impacto en salud de la contaminación del aire a nivel individual podría no ser tan visible, el impacto de la contaminación en la salud de la población puede ser bastante importante si se considera que toda la población está expuesta a la contaminación (Künzli and Pérez 2007), y en particular para los grupos de población vulnerables (Giles et al. 2011).

## 2.2. Normas de calidad del aire en Chile y vigilancia ambiental

El ambiente es uno de los determinantes sociales de la salud propuestos por la Organización Mundial de la Salud (OMS). En base a esto, cada país establece estándares de calidad del aire con el objetivo de proteger a la población contra los efectos adversos de la contaminación. Dichos estándares varían en función del enfoque adoptado en cada país, con el fin de equilibrar los riesgos para salud, la viabilidad tecnológica, los aspectos económicos y otros factores políticos y sociales de diversa índole, que a su vez dependerán, del nivel de desarrollo y la capacidad nacional en relación con la gestión de la calidad del aire (Chan and Danzon 2005).

Los estándares de calidad del aire están contenidos en las normativas de cada país, los cuales se establecen para los llamados “contaminantes criterio”, definidos como los contaminantes que son ubicuos y para los cuales se conoce o sospecha que son perjudiciales para la salud pública y el medio ambiente (Suh et al. 2000). Actualmente, hay 6 contaminantes criterio: partículas con diámetros aerodinámicos menores de 10 y 2,5 micrómetros ( $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$ , respectivamente), ozono ( $O_3$ ), dióxido de azufre ( $SO_2$ ), dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), monóxido de carbono (CO) y plomo (Pb).

La Tabla 1 muestra los estándares de calidad del aire para algunos contaminantes criterio establecidos en Estados Unidos (EPA-EEUU), la Unión Europea y Chile, así como los valores recomendados por la OMS en las Guías de Calidad del Aire publicadas en el año 2005 (GCA OMS). En general, se puede observar que Chile tiene los estándares menos exigentes, con valores muy superiores a los recomendados por la OMS.

**Tabla 1. Estándares de calidad de aire y valores recomendados por la OMS para contaminantes criterio.**

	<b>GCA (OMS)</b>	<b>EPA (EEUU)</b>	<b>Unión Europea</b>	<b>Chile</b>
<b>Material Particulado (MP<sub>10</sub>)</b>				
Norma diaria	50 µg/m <sup>3</sup>	150 µg/m <sup>3</sup>	50 µg/m <sup>3</sup>	150 µg/m <sup>3</sup>
Norma anual	20 µg/m <sup>3</sup>	-	40 µg/m <sup>3</sup>	50 µg/m <sup>3</sup>
<b>Material Particulado (MP<sub>2,5</sub>)</b>				
Norma diaria	25 µg/m <sup>3</sup>	35 µg/m <sup>3</sup>	-	50 µg/m <sup>3</sup>
Norma anual	10 µg/m <sup>3</sup>	12 µg/m <sup>3</sup>	25 µg/m <sup>3</sup>	20 µg/m <sup>3</sup>
<b>Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)</b>				
Norma 1 hora	103 ppb	100 ppb	103 ppb	213 ppb
Norma anual	21 ppb	53 ppb	21 ppb	53 ppb
<b>Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)</b>				
Norma 10 minutos	500 µg/m <sup>3</sup>	-	-	-
Norma 1 hora	-	196 µg/m <sup>3</sup>	200 µg/m <sup>3</sup>	350 µg/m <sup>3</sup>
Norma diaria	20 µg/m <sup>3</sup>	-	125 µg/m <sup>3</sup>	150 µg/m <sup>3</sup>
Norma anual	-	-	-	60 µg/m <sup>3</sup>
<b>Ozono (O<sub>3</sub>)</b>				
Norma 8 horas	51 ppb	70 ppb	61 ppb	61 ppb
<b>Monóxido de Carbono (CO)</b>				
Norma 1 hora	26 ppm	35 ppm	-	26 ppm
Norma 8 horas	9 ppm	9 ppm	9 ppm	9 ppm

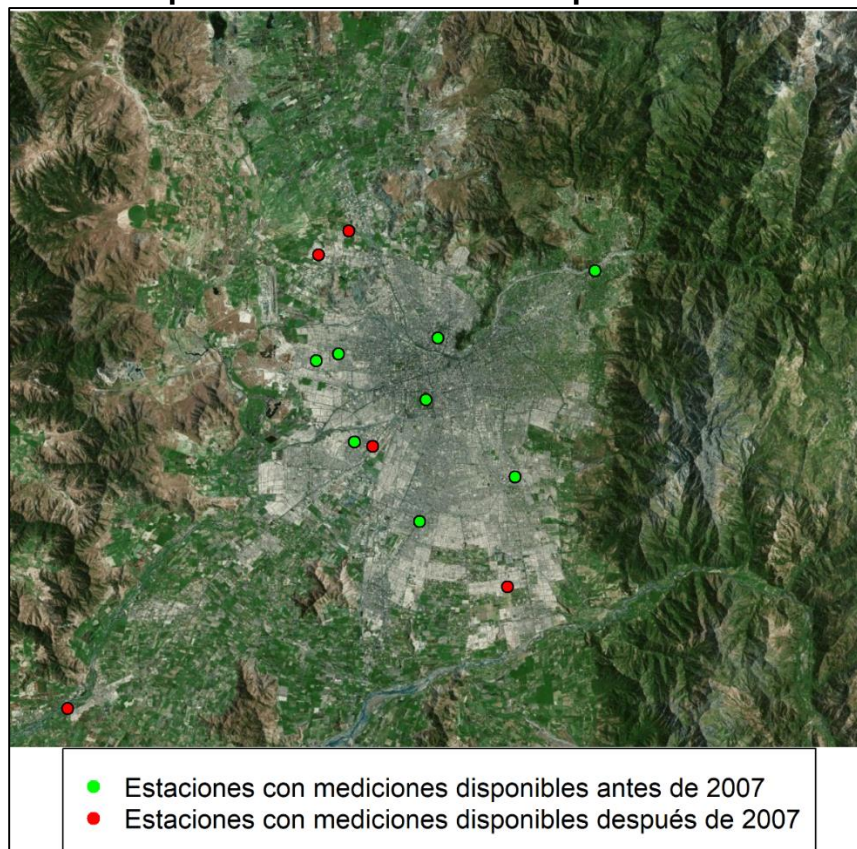
Fuente: Elaboración propia en base a Guías de Calidad del Aire-OMS (Chan and Danzon 2005), National Air Quality Standards-EPA (Agency Environmental Protection n.d.) Air Quality Standards-European Commission (European Commission n.d.) y Decretos Supremos de Normas de Calidad de Aire en Chile (D.S. N° 59/98 Ministerio Secretaría General de la Presidencia 1998; DS N°12/2012 Ministerio del Medio Ambiente 2012; D.S. N° 114/02 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República 2002; República 2002; DS N°104/2019 Ministerio del Medio Ambiente 2019; D.S. N°115/02 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia 2002)

Una forma de vigilar el cumplimiento de las normativas de calidad de aire es a través del monitoreo continuo de los contaminantes. Desde mediados de los años ochenta, en la ciudad de Santiago ha operado una red de monitoreo que mide, continuamente, las concentraciones de diferentes contaminantes, principalmente de MP (Gallardo et al. 2018; Jhun et al. 2013). Esta red cuenta con el apoyo del Ministerio de Medio Ambiente de Chile y fue concebida principalmente para evaluar el cumplimiento de las normas de calidad del aire (Osses, Gallardo, and Faundez 2013; Centro de Análisis de Políticas Públicas 2016), así como facilitar la investigación de perfiles espaciales y temporales de contaminación del aire en toda el área metropolitana (Jhun et al. 2013).

La Figura 2, muestra el mapa de Santiago y la ubicación geográfica de las 13 estaciones de monitoreo dependientes del Ministerio del Medio Ambiente. Estas

estaciones disponen de los datos del monitoreo de calidad de aire en línea, para diferentes contaminantes ambientales en sus concentraciones horarias, diarias y anuales; no obstante, el inicio de su funcionamiento ha sido paulatino en el tiempo.

**Figura 2. Mapa de Santiago y la red de estaciones de monitoreo según período de mediciones disponibles.**



Fuente: Elaboración propia en base a información del Sistema Nacional de Calidad del Aire (Ministerio del Medio Ambiente Gobierno de Chile n.d.)

La Tabla 2 muestra información sobre los tipos de contaminantes medidos en cada estación de monitoreo e información sobre su representatividad poblacional. Como se puede observar en la Tabla 2 (al igual que en la Figura 2), cinco estaciones de monitoreo no tienen mediciones disponibles antes del año 2007, debido a que iniciaron sus funciones en fechas posteriores. El resto de las estaciones (8), iniciaron sus operaciones a partir del año 1998, disponiendo de información de monitoreo para  $MP_{10}$ ,  $SO_2$ ,  $O_3$  y  $CO$ , y solo 4 de estas estaciones disponen, adicionalmente, de información para  $MP_{2.5}$ . Los instrumentos y procedimientos de control de calidad para la red de monitoreo han seguido las recomendaciones de la

Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos. Por otro lado, todas las estaciones tienen una estación de monitoreo meteorológico asociada, con mediciones de temperatura, humedad relativa del aire, velocidad y dirección del viento.

**Tabla 2. Descripción de los tipos de contaminantes medidos en las estaciones de monitoreo y representatividad poblacional.**

Estación	Comuna	Contaminantes medidos						Representatividad (EMRP)
		MP <sub>10</sub>	MP <sub>2,5</sub>	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	CO	
Cerrillos	Cerrillos	X	X					No
Cerrillos I	Cerrillos	X	X	X	X	X	X	MP10, SO2, O3, CO
Cerro Navia	Cerro Navia	X	X	X	X	X	X	MP10
El Bosque	El Bosque	X	X	X	X	X	X	MP10, SO2, O3, CO
Independencia	Independencia	X	X	X	X	X	X	MP10, SO2, O3, CO
La Florida	La Florida	X	X	X	X	X	X	MP10, SO2, O3, CO
Las Condes	Las Condes	X	X	X	X	X	X	MP10, SO2, O3, CO
Pudahuel	Pudahuel	X	X	X	X	X	X	MP10, SO2, O3, CO
Puente Alto	Puente Alto	X	X	X	X	X	X	MP10
Quilicura	Quilicura	X	X					No
Quilicura I	Quilicura	X	X	X	X	X	X	MP10
Parque O'Higgins	Santiago	X	X	X	X	X	X	MP10, SO2, O3, CO
Talagante	Talagante	X	X	X	X	X	X	MP10

X: mediciones disponibles antes de 2007; X: mediciones disponibles después de 2007; EMRP: estación de monitoreo con representatividad poblacional

Fuente: Elaboración propia en base a información del Sistema Nacional de Calidad del Aire (Ministerio del Medio Ambiente Gobierno de Chile n.d.)

Una estación de monitoreo con representatividad poblacional (EMRP), significa que la estación tendrá representatividad para la población expuesta consistente en un área de radio de 2 km contados desde la ubicación de la estación, y está dada por el cumplimiento de 3 criterios (Ministerio del Medio Ambiente Gobierno de Chile n.d.): (i) que exista al menos un área edificada habitada en un círculo de radio de 2 km, contados desde la ubicación de la estación; (ii) que esté colocada a más de 15 m de la calle o avenida más cercana, y a más de 50 m de la calle o avenida más cercana que tenga un flujo igual o superior a 2.500 vehículos/día y; (iii) que esté colocada a más de 50 m de la salida de un sistema de calefacción (que utilice carbón, leña o petróleo) o de otras fuentes fijas similares. Estos criterios se describen de manera explícita en la normativa nacional de calidad de aire

correspondiente a cada contaminante. La mayoría de las estaciones de monitoreo cumple con los criterios de EMRP para el contaminante MP<sub>10</sub> (Tabla 2).

### **2.3. Políticas públicas enfocadas en la reducción de la contaminación del aire en Santiago, Chile**

En los últimos 30 años, la contaminación atmosférica en Santiago, Chile, ha sido una permanente preocupación para el gobierno y la población (Jhun et al. 2013; Figueroa et al. 2013; Centro de Análisis de Políticas Públicas 2016). A partir de la década de 1990, se comenzaron a realizar importantes esfuerzos para reducir la contaminación del aire, principalmente enfocados en reducir las emisiones relacionadas con la industria y el transporte (Rose-Pérez 2015; Jhun et al. 2013). Algunos ejemplos de éstos esfuerzos, incluyeron intervenciones en el sector transporte para reducir la resistencia a la rodadura, inspecciones obligatorias de vehículos, el rediseño del sistema de transporte público y reemplazo gradual de la flota de autobuses más antigua con autobuses de combustible diésel más limpios (Jhun et al. 2013; Gallardo et al. 2018).

A pesar de las diversas estrategias, en el año 1996, Santiago fue declarada zona saturada para MP<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>, por lo cual dos años después se aprobó el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) de la Región Metropolitana que ha sido modificado en 2003, 2009 y 2015, incluyendo actualmente el MP<sub>2,5</sub> (Gobierno de Chile 2008; Centro de Análisis de Políticas Públicas 2016). El PPDA estableció medidas para la descontaminación en 2 sectores principales: Sector transportes y combustibles y Sector industrial, comercial y residencial.

Las medidas aplicadas en el sector transporte y combustibles incluyeron la eliminación del plomo de la gasolina (comenzó a fines de los noventa), reducción del azufre en el combustible diésel (5000 ppm en 1989 a 15 ppm en la actualidad), la prohibición del uso del automóvil durante las emergencias ambientales, un programa obligatorio de inspección y mantenimiento del automóvil, normas de emisión más estrictas (EURO I a EURO III desde 2007, actualmente EURO VI) y la

modernización de la flota del transporte público (Jhun et al. 2013; Figueroa et al. 2013; Barraza et al. 2017; Sax et al. 2007; Villalobos et al. 2015).

La modernización de la flota del transporte público fue una de las grandes políticas del gobierno, denominada "Reforma al transporte público". El 10 de febrero del año 2007, se puso en marcha la implementación de la renovación completa del sistema de transporte público de la ciudad, llamado "Transantiago" (TS), el cual generó una transformación en un solo día (Muñoz, Batarce, and Hidalgo 2014). Radicalmente, se disminuyó de manera importante la cantidad de autobuses (de 8000 a 5000, aproximadamente), con una renovación de la flota de autobuses antiguos por autobuses con estándar de emisiones Euro III o superior, además, se cambiaron los recorridos y la forma de pago, entre otras modificaciones (Figueroa et al. 2013; Muñoz, Batarce, and Hidalgo 2014; Bohme 2016; Gallego, Montero, and Salas 2013). En un comienzo tuvo innumerables problemas de diseño e implementación, siendo muy cuestionado por los medios de prensa, los usuarios y no usuarios del transporte público, no obstante, algunos de estos problemas se fueron resolviendo con ajustes posteriores (Muñoz, Batarce, and Hidalgo 2014; Gallego, Montero, and Salas 2013).

### 3. Reforma al transporte público y estudios de evaluación del impacto en la calidad del aire

El transporte público en Santiago estuvo en manos de empresas privadas desde finales de los años setenta, y a partir de 1990 la concesión del transporte público unificó el color de los autobuses (amarillo con techo blanco), siendo reconocido por los habitantes de Santiago como las “micro amarillas” (Figura 3) (Briones 2009). Esta concesión contaba con cerca de 8.000 autobuses, alrededor de 3.000 operadores no profesionales, una gran competencia en la calle por los pasajeros (el salario de los conductores dependía de los pasajes vendidos), no había integración tarifaria entre autobuses y metro, y como los mismos conductores cobraban la tarifa de los pasajes, se reportaban asaltos de manera frecuente (Briones 2009; Muñoz, Batarce, and Hidalgo 2014). Además, la falta de mantenimiento de los autobuses provocó que se emitieran altos niveles de contaminantes del aire, se generaran ruidos molestos y una elevada tasa de accidentes (Muñoz, Batarce, and Hidalgo 2014; Muñoz, Ortúzar, and Gschwender 2009). Todos estos factores impulsaron al gobierno del año 2001 a proponer un cambio en el sistema, iniciándose ese año el diseño de la reforma al transporte público, basado en experiencias exitosas de otras ciudades de América del Sur (Bogotá y Curitiba) (Briones 2009; Muñoz, Ortúzar, and Gschwender 2009).

El principal propósito del diseño del TS era aumentar la participación del transporte público en los viajes de la ciudad, lo cual consideraba generar una serie de beneficios al reducir las externalidades negativas que eran provocadas por éste, como la reducción de la contaminación del aire, los niveles de ruido y los accidentes que involucraran autobuses del transporte público (Muñoz, Ortúzar, and Gschwender 2009). Sin embargo, también se esperaba una mejor satisfacción a nivel del usuario en términos de mejorar la conectividad entre autobuses del TS y metro, reducir los tiempos de viaje y aumentar la aceptación de este medio de transporte, de ésta forma persuadir a los conductores a que abandonaran sus vehículos particulares (Gallego, Montero, and Salas 2013; Muñoz, Batarce, and Hidalgo 2014; Muñoz, Ortúzar, and Gschwender 2009; Briones 2009).



El diseño de esta reforma fue parte de las políticas del gobierno vigente en ese período, el cual exigió que el sistema debía ser sostenible desde el punto de vista ambiental, social y económico (Briones 2009). La sostenibilidad ambiental era importante porque un cambio drástico era la única forma previsible de alcanzar los objetivos de reducción de la contaminación del aire definidos en los planes de descontaminación, por otro lado, la sostenibilidad económica y social significaba que TS tendría que estar libre de subsidios y cobrar una tarifa promedio similar al sistema anterior (Briones 2009).

El diseño del nuevo sistema estuvo a cargo de la Subsecretaría de Transportes del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT), cuyo rediseño incluía una red de servicios de alimentadores y troncales, donde el metro funcionaría como una red troncal (Muñoz, Ortúzar, and Gschwender 2009). Esto consideraba reducir el tamaño de la flota y la extensión de cada recorrido, con lo cual se reducirían los costos operativos y las externalidades de los autobuses (contaminación, ruido, accidentes). Lo anterior significaba que los pasajeros tendrían que hacer trasbordos en su viaje, sin embargo, como el sistema contemplaba una tarifa integrada, esto no aumentaría el costo económico para los pasajeros (Briones 2009; Muñoz, Batarce, and Hidalgo 2014). Las principales características del sistema antiguo y el TS se muestran en la Figura 3.

Como se comentó anteriormente, la implementación de la reforma al transporte público fue de un día para otro, es decir, a partir del 10 de febrero de 2007, los usuarios tuvieron que enfrentar los cambios descritos. Uno de los principales problemas de la implementación fue que la mayoría de las condiciones de infraestructura, tecnología y operación requeridas por sus diseñadores no estaban disponibles, además, la flota de autobuses reducida en un 30% se hizo insuficiente para hacer frente a la demanda (Muñoz, Batarce, and Hidalgo 2014). Esto resultó en un comienzo extremadamente caótico para los usuarios, con tiempos de espera y niveles de aglomeración peores que los del sistema anterior.

**Figura 3. Características del sistema de transporte público antiguo y Transantiago.**



Fuente: Elaboración propia.

Las principales críticas al diseño e implementación fueron: (i) la decisión de hacer una implementación en un día que implicó que toda la ciudad debió cambiar las rutas simultáneamente, (ii) la escasez de servicios y falta de control, y (iii) el enfoque en la reducción de consecuencias ambientales sacrificando la calidad del servicio (Muñoz, Batarce, and Hidalgo 2014). Otra fuerte crítica al diseño de la reforma, fue que se gestó sin ningún tipo de consulta pública (ciudadana o municipal), lo cual habría permitido anticipar algunos de los problemas en la implementación (Briones 2009).

Los indicadores del efecto de la intervención comenzaron a aparecer rápidamente, en especial aquellos que afectaron directamente a los usuarios; el tiempo de viaje promedio, debido a los transbordos y la falta de frecuencia, aumentó un 30% (de 102 a 133 minutos), en contraste con el tiempo de viaje de los automóviles y los taxis, el cual no se afectó considerablemente. Gallego et al. en 2013 reportaron que la demanda y el costo de taxis en Santiago se duplicó a causa de TS (Gallego, Montero, and Salas 2013). Por otro lado, la Secretaría de Planificación del

Transporte (SECTRA), reportó que los viajes utilizando el transporte público se redujeron de 32% a 29%, en contraste con el crecimiento de la proporción de viajes en vehículos privados de un 25% a un 28% (Secretaría de Planificación del Transporte 2012, 2001), contraponiéndose a uno de los propósitos principales del TS.

La reforma del transporte público ha sido estudiada por varios investigadores desde diferentes perspectivas: artículos descriptivos del plan escritos antes de su implementación (Fernández, De Cea, and Malbran 2008), evaluaciones después de su implementación enfocados en explicar las causas de las dificultades (Muñoz, Ortúzar, and Gschwender 2009; Muñoz, Batarce, and Hidalgo 2014; Briones 2009) y el análisis de impactos en aspectos particulares (Gallardo et al. 2018; Gallego, Montero, and Salas 2013; Ureta 2014), como el impacto del TS en el medio ambiente. En general, los objetivos ambientales de TS no se alcanzaron inicialmente, excepto por la reducción en los niveles de emisión de ruido que fue particularmente notable en el centro de la ciudad (Briones 2009). Por otro lado, la contaminación atmosférica durante 2007 fue mayor que en años anteriores, y algunos lo han atribuido al aumento en el uso de automóviles en reacción a las dificultades de TS (Muñoz, Ortúzar, and Gschwender 2009).

### **3.1. Evaluación del impacto del TS en la calidad del aire**

Considerando el diseño y la forma de implementación de la reforma al transporte público, se podría esperar un efecto directo del TS en la calidad del aire. La aplicación de esta reforma ha sido estudiada por varios investigadores desde diferentes perspectivas, incluyendo aquellos que han evaluado su impacto en la calidad del aire, utilizando diferentes metodologías de evaluación y llegando a conclusiones diversas. A continuación, se describen brevemente aquellos estudios que han evaluado la calidad del aire en Santiago antes y después de la implementación del TS en el año 2007 (una descripción más detallada de los estudios puede ser revisada en la sección Anexos, Tabla A 1).

El Centro de Investigación Mario Molina (2008), realizó mediciones de  $MP_{10}$ ,  $MP_{2,5}$  y Óxidos de Nitrógeno ( $NO_x$ ) a nivel de calle en 2 grandes avenidas santiaguinas durante los inviernos de 2006 y 2007, reportando reducciones de aproximadamente 50% del flujo de autobuses, 25% en la concentración de  $MP_{2,5}$  y 50% en la concentración de  $NO_x$ , sin embargo, también reportó un aumento del 45% en la concentración de  $MP_{10}$  y un aumento de flujo de automóviles privados (Centro Mario Molina 2008).

Gallego et al. (2013) estudiaron el impacto del TS en las concentraciones diarias de CO como sustituto de las emisiones de vehículos livianos, considerando las horas de mayor tráfico (7 a 9 AM), todos los meses del año entre 2005 y 2008 e incluyendo los datos de 7 estaciones de monitoreo. Estos autores concluyeron que no hubo efectos en las concentraciones de CO de corto plazo (1° mes posterior a TS), sin embargo encontró un aumento del 27% en la concentración de CO de largo plazo (7 meses posterior a TS), atribuible a un aumento en el uso de vehículos livianos como consecuencia a los problemas asociados al TS y mayor congestión vehicular (Gallego, Montero, and Salas 2013).

Figuroa et al. (2013) investigó el efecto de TS en la concentración diaria de  $MP_{10}$  ( $\mu g/m^3$ ) en el período 1997-2009, utilizando solo las mediciones de los meses invernales en un modelo de efectos fijos por estación de monitoreo (7 estaciones) y día de la semana, atribuyendo al TS una disminución de  $3,9 \mu g/m^3$  en el promedio diario de  $MP_{10}$ , ajustado por variables confusoras meteorológicas (Figuroa et al. 2013). Usando una metodología similar a la de Figuroa et al. (2013), Bohme (2016) estudió el efecto del TS en las concentraciones diarias de  $MP_{10}$ ,  $MP_{2,5}$  y  $NO_x$  como indicadores de calidad del aire y las concentraciones de CO como indicador de emisiones de vehículos livianos, reportando que las concentraciones de  $MP_{10}$  disminuyeron debido al TS en  $6,06 \mu g/m^3$ , sin encontrar cambios significativos en el  $MP_{2,5}$  y  $NO_x$ . Este autor no encontró efectos en el uso de vehículos livianos al contrario de lo reportado por Gallego et al. (2013) (Bohme 2016).

Otros estudios, han comparado las concentraciones de un período previo y otro posterior al TS, sin declarar como objetivo el evaluar su impacto. Juhn et al. (2013) evaluó el impacto de intervenciones relacionadas con el combustible analizando la tendencia ajustada de las concentraciones diarias de  $MP_{2,5}$  y algunos de sus componentes (S, K, Fe, Br, Pb, Cr, Ni) durante los meses de abril-agosto entre 1998-2010 considerando solo una estación de monitoreo (Estación Parque O'Higgins) como representativa de todo Santiago. Este estudio encontró una disminución del  $MP_{2,5}$  anual de  $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$  entre 1988 y 1997 ( $76$  a  $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente) y de  $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$  entre 1998 y 2009 ( $43$  a  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente), no obstante, reportó un aumento de  $7,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en las concentraciones anuales entre 2005 y 2008, donde los autores sugieren que esto fue impulsado por un aumento en las ventas mensuales de combustible basado en el petróleo. El Pb y el Br disminuyeron de  $0,366$  a  $0,026 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y de  $0,110$  a  $0,008 \mu\text{g}/\text{m}^3$  entre 1998 y 2010, respectivamente, atribuido a la eliminación del Pb de la gasolina. El Azufre (S) ambiental disminuyó de  $1,59$  a  $1,08 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el mismo período, asociado a la reducción de este componente en los combustibles. Por otro lado, los trazadores de combustión de biomasa (K), de tráfico (Cr, Fe) y de combustión de petróleo (Ni) mostraron una tendencia al aumento, similar a  $MP_{2,5}$  en 2005-2008 (Jhun et al. 2013).

Por otro lado, Toro et al. (2014), estudió las tendencias a largo plazo y la variabilidad espacial de  $MP_{2,5}$  y  $MP_{10}$  en Santiago, utilizando los datos de 2000 a 2012 de 4 estaciones de monitoreo, reportando una disminución general en las concentraciones anuales  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$  antes de 2005, mientras que se produjo un aumento en 2007 y de 2008 a 2009. Además, reportó una disminución del porcentaje de días en que se superó el estándar diario chileno y el valor recomendado por la OMS en el período 2000-2012 en ambos contaminantes, encontrando grandes diferencias entre las estaciones de monitoreo estudiadas (Toro et al. 2014).

Finalmente, Barraza et al. (2017) evaluó la tendencia de las contribuciones desde fuentes de  $MP_{2,5}$  diario entre 1998-2012 utilizando los datos de una estación de

monitoreo (Estación Parque O'Higgins), reportando que la concentración total de  $MP_{2,5}$  disminuyó pero que sus fuentes no han variado en la misma proporción. La principal reducción se observó en las fuentes de emisiones de fundición de cobre (disminuyó de 33% 1998-1999 a 5% 2011-2012) explicado por mejoras tecnológicas en las fundiciones. La fuente de emisión de vehículos motorizados ha disminuido en  $2,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (21%), con una reducción no lineal: entre 2000-2002 disminuyó en  $2,89 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (27%) probablemente por mejoras de la calidad de la gasolina; entre 2003-2006 aumentó debido al aumento en el número de vehículos motorizados en Santiago y entre 2007-2008 aumentó en  $5,68 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (56,6%), no obstante los años 2004-2005 vs 2010-2011 presentan una disminución de  $3,04 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (32,4%) que se podría atribuir a un efecto de largo plazo de la implementación de TS. Entre 1998 y 2012 las fuentes industriales disminuyeron un 39%, el polvo urbano aumentó de 3 a 7%, el humo de leña no presentó cambios (en estación fría su contribución fue de 30%) y las fuentes costeras disminuyeron en 58% (Barraza et al. 2017).

En resumen, los hallazgos del impacto del TS en la calidad del aire apuntan hacia una reducción en los niveles de  $MP_{10}$  en el largo plazo, ningún efecto sobre los niveles de  $MP_{2,5}$  y  $NO_x$ , y hallazgos contradictorios para CO. Con respecto a la composición de  $MP_{2,5}$  y las fuentes principales, los hallazgos son explicados principalmente por la implementación de políticas que han reducido el contenido de Pb y S en los combustibles. Los estudios anteriormente descritos, han tenido diferencias metodológicas que los hacen poco comparables con respecto a las técnicas de modelación utilizadas, el número de estaciones de monitoreo analizadas (1 versus 7) y el período de medición (solo inviernos o año completo), entre otras. Además, ninguno de estos estudios se ha enfocado en analizar el impacto del TS en diferentes zonas geográficas de la Región Metropolitana.

Finalmente, aunque Chile está en una buena posición en términos económicos, es uno de los países más inequitativos de la región de América Latina y el Caribe. Esta desigualdad a nivel nacional también se expresa en las áreas urbanas del país, particularmente en Santiago, que es una ciudad segregada social, económica y

ambientalmente (Gallardo et al. 2018). Lo anterior permite suponer que la distribución del impacto del TS no necesariamente tuvo que ser homogénea en toda la ciudad de Santiago, por lo que es esencial evaluar la heterogeneidad de estos impactos y la existencia de diferencias en el efecto encontrado a través de variables socioeconómicas, para asegurarse de que los posibles beneficios de una intervención no contribuyan a generar o exacerbar las desigualdades existentes.

## 4. Uso de Series de Tiempo Interrumpidas para evaluar el impacto de una intervención

Una serie de tiempo es una secuencia de variables aleatorias que habitualmente se pueden visualizar como “ $n$ ” observaciones (datos), ordenadas y equidistantes cronológicamente o parametrizadas respecto al tiempo, sobre una característica (serie univariante) o sobre varias características (serie multivariante) de una unidad observable en diferentes momentos (Biglan, Ary, and Wagenaar 2000; Bhaskaran et al. 2013; Box, Jenkins, and Reinsel 2016; Aguirre 1994). Los datos de monitoreo de calidad del aire en las ciudades, corresponden a una serie de tiempo que contiene los valores de los niveles de contaminantes según la unidad temporal en que sean medidos (horarios, diarios, mensuales, anuales); esta característica de los datos ha permitido estudiar de forma longitudinal la variabilidad de los contaminantes en el tiempo y relacionarlos con desenlaces de salud de corto, mediano y largo plazo (Liu et al. 2018; Laurent et al. 2007; Li et al. 2012; Ab Manan, Noor Aizuddin, and Hod 2018; Dales, Cakmak, and Blanco-Vidal 2010).

Adicionalmente, las series de tiempo de los datos de monitoreo de calidad del aire han sido útiles en la evaluación del cumplimiento de los estándares de calidad del aire, así como de las estrategias e intervenciones para la reducción de la contaminación del aire, lo cual ha permitido el desarrollo del conocimiento sobre los efectos de dichas intervenciones en circunstancias en que otros diseños serían demasiado costosos, prematuros o poco prácticos (Biglan, Ary, and Wagenaar 2000; López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017).

El análisis de Series Temporales Interrumpidas (STI) es una valiosa herramienta para evaluar la efectividad a nivel poblacional, de intervenciones de salud o políticas públicas de diversa índole que se han implementado en un momento del tiempo claramente definido (López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017; Biglan, Ary, and Wagenaar 2000; Linden 2015; Zhang, Wagner, and Ross-Degnan 2011; Kontopantelis et al. 2015; Shadish, Cook, and Campbell 2002). Este análisis se ha usado, frecuentemente, en la evaluación de “experimentos naturales” que ocurren



en entornos del mundo real (Lau et al. 2015; Dennis et al. 2013; Hawton et al. 2013; Derde et al. 2014; Grundy et al. 2009), debido a la creciente disponibilidad y calidad de los datos de rutina recolectados a través del tiempo, que abarcan antes y después de las intervenciones (López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017; Lagarde 2012; Shadish, Cook, and Campbell 2002; Kontopantelis et al. 2015).

El análisis de STI ha sido usado frecuentemente para evaluar e investigar los efectos de políticas o intervenciones evaluando el patrón de cambio a lo largo del tiempo (Biglan, Ary, and Wagenaar 2000; Shadish, Cook, and Campbell 2002; Lagarde 2012). Éste análisis se basa en el estudio de la manipulación de una variable independiente (intervención) y la observación de sus efectos en la serie temporal de la variable dependiente (López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017; Zhang, Wagner, and Ross-Degnan 2011; Kontopantelis et al. 2015). El efecto de la variable independiente es una función de: (i) el número de puntos de datos previos a la intervención (referencia), (ii) el número de puntos de datos correspondientes a la intervención, (iii) el número de puntos de datos posteriores a la intervención y (iv) la variabilidad de los datos (López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017; Linden 2015; Shadish, Cook, and Campbell 2002; Biglan, Ary, and Wagenaar 2000). Por lo tanto, dentro de cada serie de tiempo (previa y posterior a la intervención), se puede examinar si la pendiente o el nivel de la serie de tiempo cambia cuando se manipula la variable independiente y, además, se pueden comparar estos cambios entre diferentes unidades de observación.

El diseño básico de un análisis de STI utiliza una serie de tiempo de una variable de interés, para establecer una tendencia subyacente, que es “interrumpida” por una intervención en un punto conocido en el tiempo (Biglan, Ary, and Wagenaar 2000; Linden 2015; Lagarde 2012; Shadish, Cook, and Campbell 2002). El escenario “contrafactual” corresponde al escenario hipotético bajo el cual no se realizó la intervención y la tendencia continuaría sin cambios, es decir, la tendencia “esperada” en ausencia de la intervención dada la tendencia preexistente. Este escenario contrafactual, proporciona una comparación para la evaluación del impacto de la intervención, debido a que evalúa cualquier cambio que ocurra en el

período posterior a la intervención (López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017; Kontopantelis et al. 2015; Shadish, Cook, and Campbell 2002). Un aspecto relevante a considerar en este análisis, es si la intervención podría presentar retrasos en producir un efecto en la variable resultado (Bhaskaran et al. 2013; Zhang, Wagner, and Ross-Degnan 2011; López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017).

En general, un análisis de STI permite al investigador: (i) estimar si una intervención ocasionó un cambio y la magnitud del cambio en la variable de interés (basado en su tendencia antes de la intervención), (ii) si los efectos ocurrieron inmediatamente después de la intervención o con retraso, (iii) si los efectos fueron transitorios o a largo plazo y, (iv) si otros factores (además de la intervención) podrían explicar los cambios observados (Zhang, Wagner, and Ross-Degnan 2011; Shadish, Cook, and Campbell 2002; Lagarde 2012).

Los componentes de una serie de tiempo: tendencia, estacionalidad, ciclo y variación irregular son elementos que deben ser considerados cuando se va a realizar un análisis de STI (Jebb et al. 2015; Shadish, Cook, and Campbell 2002; Aguirre 1994). La **tendencia** es cualquier cambio sistemático en el nivel de una serie, es decir, su dirección a largo plazo; tanto la dirección como la pendiente de una tendencia pueden permanecer constantes o cambiar a lo largo de la serie. La tendencia debe modelarse cuando ésta es teóricamente interesante como en el análisis de STI, en cambio, la tendencia debe eliminarse mediante transformaciones matemáticas cuando este componente no es pertinente para los objetivos del análisis (por ejemplo, un pronóstico) (Jebb et al. 2015; Bhaskaran et al. 2013; Box, Jenkins, and Reinsel 2016). La **estacionalidad** es un patrón repetitivo de aumento y disminución en la serie que ocurre de manera constante a lo largo de su duración, asimismo, se puede definir como un patrón de movimiento cíclico o repetitivo dentro de un período de 1 año o menos, que se atribuye a factores "estacionales". No obstante, aunque su patrón subyacente permanezca fijo, la magnitud de un efecto estacional puede variar entre períodos. Esta fuente de variación a menudo se elimina de la serie temporal mediante un procedimiento

conocido como ajuste estacional (Jebb et al. 2015; Bhaskaran et al. 2013; López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017; Linden 2015). El **componente cíclico** en una serie temporal es similar a un componente estacional, es un patrón de fluctuación (aumento o disminución) que se repite a través de períodos de tiempo, sin embargo, los patrones representados por los efectos cíclicos no son de duración fija y no son atribuibles a ningún período de tiempo natural. Es decir, los ciclos son cualquier componente no estacional que varía en un patrón reconocible; generalmente ocurren durante un período mayor a 2 años (podría ser más corto), y la magnitud de los efectos cíclicos es generalmente más variable que la de los efectos estacionales (Jebb et al. 2015; Box, Jenkins, and Reinsel 2016). La **variación irregular** (aleatoriedad) representa ruido estocástico y es análogo a los términos de error incluidos en varios tipos de modelos estadísticos. Constituye cualquier variación restante en una serie de tiempo después de que los tres componentes sistemáticos se hayan dividido; cuando este componente es completamente aleatorio (sin autocorrelación), se lo denomina ruido blanco y desempeña un papel importante tanto en la teoría como en la práctica del modelado de series de tiempo. Después de que un modelo se ha ajustado a los datos, los residuos forman una serie temporal propia, llamada serie de errores residuales. Si el modelo estadístico ha tenido éxito en dar cuenta de todos los patrones en los datos, la serie de errores residuales no debería ser más que términos de error de ruido blanco, no relacionados con una media de cero (Jebb et al. 2015; Box, Jenkins, and Reinsel 2016).

Los principales problemas metodológicos asociados con el análisis de STI que han sido descritos en la literatura son: las tendencias estacionales, la dispersión excesiva de los datos de la serie temporal, la autocorrelación, y el control de los factores de confusión que varían en el tiempo (López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017; Linden 2015). Cada uno de estos aspectos describe a continuación:

- **Estacionalidad:** puede ocasionar dos problemas: (i) si existe una distribución desigual de meses antes y después de la intervención, por ejemplo, una mayor

proporción de meses de invierno, los resultados podrían sesgarse, especialmente si la serie de tiempo es corta; (ii) si los valores de la variable resultado de un mes tienden a ser más similares a los de los meses contiguos en la misma época del año, podría aparecer la autocorrelación y la sobredispersión (Biglan, Ary, and Wagenaar 2000; Linden 2015; López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017; Shadish, Cook, and Campbell 2002).

- **Sobredispersión:** si la variable respuesta corresponde a datos de conteo con una distribución de Poisson (cuyo supuesto es que el conteo esperado coincide con la varianza), usualmente aparece la sobredispersión debido a que la varianza con frecuencia tiende a ser mayor, lo que lleva a una estimación incorrecta de los errores estándar. En este caso, se puede realizar un ajuste de escala para reformular el modelo de manera de corregir este problema. Por otro lado, este problema no se aplica al análisis de resultados continuos cuando se asume una distribución gaussiana, aunque debe estimarse un error residual (López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017; Linden 2015; Biglan, Ary, and Wagenaar 2000).
- **Autocorrelación:** en los datos de series de tiempo las observaciones consecutivas tienden a estar relacionadas, dada la estructura temporal de sus mediciones que hace que el tiempo sea un parámetro importante que considerar, esto se conoce como autocorrelación. Frecuentemente, la autocorrelación se explica en gran medida por la estacionalidad (discutida anteriormente); por lo tanto, después de controlar este factor, la autocorrelación residual raramente es un problema. De todas formas, la autocorrelación debe ser evaluada examinando la gráfica de los residuos y la función de autocorrelación parcial; si persiste la autocorrelación residual, debería ajustarse el análisis usando otros métodos como la estimación de Prais-Winsten o el modelo autorregresivo integrado de promedio móvil (ARIMA) (Linden 2015; López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017).

- **Factores de confusión variables en el tiempo:** el análisis de STI puede verse afectado por factores de confusión variables en el tiempo que cambian rápidamente. La estacionalidad se puede considerar un factor de confusión variable en el tiempo; otros factores pueden incluir niveles de una enfermedad infecciosa específica que es propensa a brotes, variables meteorológicas o climáticas, entre otras. Cuando se han medido los factores de confusión que varían con el tiempo, pueden controlarse mediante la inclusión de variables que los representen en el modelo, como se realiza comúnmente en otros análisis epidemiológicos. Una categoría especial de factores de confusión que varían con el tiempo, son otros eventos que ocurren al mismo tiempo que la intervención y que potencialmente influyen en el resultado, por ejemplo, otras intervenciones simultáneas dirigidas al mismo resultado o eventos naturales que podrían afectar el resultado. Es crucial investigar la existencia de algún evento que coincida con la intervención y disponer de mediciones de las variables que puedan explicar el cambio observado en la variable dependiente (Biglan, Ary, and Wagenaar 2000; López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017; Linden 2015).

Otras limitaciones relacionadas con el análisis de STI que se presentan de manera menos frecuente (Biglan, Ary, and Wagenaar 2000; López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017; Lagarde 2012), pero que deben ser consideradas, son:

- La evaluación frecuente de la variable respuesta podría tener un efecto en el proceso medido, en especial si se está evaluando aspectos subjetivos que dependen del conocimiento o autopercepción de los sujetos de estudio.
- La falta de control del investigador sobre el momento en que ocurre la implementación de la intervención, hace más difícil estar seguro de que fue la intervención la que provocó el cambio observado en la serie temporal.

A pesar de los problemas metodológicos y las limitaciones descritas, el análisis de STI es un valioso enfoque para evaluar a nivel poblacional, la efectividad de una intervención que se ha implementado en un momento definido en el tiempo; en

especial si los problemas metodológicos descritos son abordados en el diseño y análisis. Finalmente, los resultados del análisis de STI y otros indicadores de los cambios ocurridos con la implementación de una intervención pueden ser aplicados a diferentes zonas geográficas y compararse según variables de contexto social con el propósito de identificar la existencia de desigualdades en el efecto de la intervención.

## 5. Evaluación de la distribución del impacto de intervenciones con enfoque de equidad

Las políticas públicas e intervenciones de salud a nivel de la población son aquellas destinadas a cambiar la distribución del riesgo para la salud al abordar las condiciones sociales, económicas o ambientales subyacentes; algunas de éstas son aplicadas directamente en el sector de salud, no obstante, frecuentemente se aplican en otros sectores como la educación, la vivienda, el ambiente o el empleo (Hawe and Potvin 2009; Graham and Kelly 2004). Estas políticas pueden tener éxito en reducir el gradiente de exposición o de salud entre los grupos más y menos desfavorecidos dentro de una población. Sin embargo, en algunos casos, las intervenciones contribuyen inadvertidamente a aumentar las desigualdades en salud e incluso pueden aumentar la brecha entre los más desfavorecidos (O'Neill et al. 2014; Graham and Kelly 2004; Rose-Pérez 2015; Cartier, Benmarhnia, and Brousselle 2015).

En el caso de las políticas de calidad del aire e intervenciones para reducir las concentraciones de contaminantes, estas desigualdades pueden estar asociadas con una exposición diferencial, que corresponde al gradiente social en la distribución espacial de contaminantes dentro de la ciudad, o a una vulnerabilidad diferencial, que se relaciona con la exposición a similares concentraciones de contaminantes, pero los efectos en salud pueden ser mayores en algunos grupos debido a otros determinantes de la salud (Thomson et al. 2018; Benmarhnia et al. 2014; Forastiere et al. 2007; Wang et al. 2016).

Las investigaciones que se han realizado sobre el impacto de políticas públicas e intervenciones de salud en la población, principalmente, se enfocan en estudiar el efecto de estas intervenciones y los procesos mediante los cuales se producen los cambios debido a su implementación (Hawe and Potvin 2009; Thomson et al. 2018). No obstante, son escasos los estudios que han evaluado los efectos de políticas específicas en las desigualdades en salud, especialmente en intervenciones

medioambientales (Thomson et al. 2018; Cartier, Benmarhnia, and Brousselle 2015; Benmarhnia et al. 2014).

Thomson et al (2018) desarrolló una revisión sistemática para identificar estudios de países de altos ingresos, que hacían alguna descripción de los efectos sobre la equidad de diferentes intervenciones de salud pública, incluyendo intervenciones ambientales (3 estudios). En general, los resultados demostraron que algunas intervenciones políticas reducen las desigualdades en salud (por ejemplo, programas de subsidio de alimentos e inmunizaciones), otras no reducen ni aumentan las desigualdades, y algunas intervenciones aumentan las desigualdades, específicamente las intervenciones de regulación ambiental (por ejemplo, regulación de la velocidad de conducción y zonas de baja emisión). Los autores concluyen principalmente que los estudios de evaluación de intervenciones que incluyen algún análisis relacionado con la distribución diferencial de los efectos según variables de contexto son muy escasos, no obstante, recomiendan y estimulan a que las futuras investigaciones describan cómo los resultados de intervenciones específicas difieren según subgrupos (Thomson et al. 2018).

La revisión sistemática descrita anteriormente, identificó los estudios utilizando una lista de factores asociados con los efectos de las intervenciones sobre la equidad, cuyo acrónimo es PROGRESS (Thomson et al. 2018). El acrónimo PROGRESS fue introducido por Evans y Brown en el año 2003, para describir una muestra de factores de estratificación social que generan variaciones en los resultados de salud, y son reforzados por O'Neil (2014) haciendo énfasis en su aplicación en la evaluación de intervenciones y políticas de salud pública con una mirada de equidad (O'Neill et al. 2014). Además, PROGRESS ha sido propuesto como marco para la Extensión de Equidad PRISMA (*PRISMA Equity Extension*) y desde los grupos de Colaboración de Campbell y Cochrane, como el Grupo de Métodos de Equidad (*Equity Methods Group*) y los Grupos de Revisión de Salud Pública y Desarrollo Internacional (*Public Health and International Development Review Groups*), en su uso en revisiones sistemáticas para guiar la conceptualización de desventajas, la extracción de datos e informar los análisis de equidad (O'Neill et al.



2014). Por otro lado, los factores propuestos o una parte de ellos han sido utilizados en estudios que han evaluado intervenciones ambientales (Cartier, Benmarhnia, and Brousselle 2015; Thomson et al. 2018).

Los componentes del acrónimo PROGRESS son: P (lugar de residencia por "*Place of residence*"), R (raza, etnia, cultura e idioma), O (ocupación), G (género y sexo), R (religión), E (educación), S (nivel socioeconómico) y S (capital social), los cuales han sido seleccionados en base a la evidencia de su impacto diferencial en la exposición o en la salud, para su consideración en el diseño de estudios que evalúan una intervención y en revisiones sistemáticas (O'Neill et al. 2014). Una descripción más detallada de los componentes se puede revisar en la Tabla A 2, en la sección de Anexos. En este marco, las desigualdades en salud existen más allá de los ingresos o el nivel socioeconómico, incluyendo varios factores de estratificación social (O'Neill et al. 2014). Los componentes de PROGRESS no siempre se aplican en su totalidad a una intervención en particular, no obstante, el acrónimo proporciona un recordatorio para decidir si un factor en particular debe considerarse al diseñar (idealmente), evaluar o monitorear una intervención, para determinar si la brecha en los resultados de salud se está reduciendo o ampliando (O'Neill et al. 2014). Además, la idoneidad de cada elemento de PROGRESS puede variar según el contexto, su definición y clasificación en el lugar donde se apliquen, así como su interacción con otros elementos contextuales. En este sentido, las categorizaciones pueden diferir dependiendo de cada país o región, así como también si los individuos se auto-clasifican o están clasificados por otros (O'Neill et al. 2014).

Frecuentemente, las políticas relacionadas con mejorar la calidad del aire se basan en intervenciones uniformes espaciales mediante instrumentos regulatorios, de control de la demanda o de diseño urbano, que influyen en las fuentes de contaminantes ya sean fijas o móviles (Cartier, Benmarhnia, and Brousselle 2015; Benmarhnia et al. 2014; Harper et al. 2013), no obstante, rara vez se evalúan las diferencias que pueden darse entre subgrupos de la población según su contexto social, en relación a la distribución de las concentraciones previas y posteriores a

la intervención, como parte de una evaluación de equidad ambiental (Chan and Danzon 2005; Rose-Pérez 2015; Geer 2014). Por el contrario, generalmente, los resultados de las intervenciones se reportan de forma nacional o regional (Chan and Danzon 2005). Una revisión sistemática realizada por Wang et al. (2016) sobre la efectividad de las estrategias de control de la contaminación del aire y los impactos en salud pública y en equidad en salud, que incluyó 15 artículos con distintas intervenciones para el control de la contaminación que abarcaron estrategias generales sobre control de la calidad del aire, intervenciones relacionadas con control de tráfico y estrategias de reducción de gases de efecto invernadero, concluyó que todas las estrategias informaron alguna mejora en la calidad del aire. No obstante solo 3 artículos consideraron alguna forma de evaluación de la equidad en sus análisis, sin resultados consistentes que indiquen que las estrategias podrían reducir o aumentar las desigualdades en la exposición o en los resultados en salud (Wang et al. 2016).

Es indispensable la medición de las desigualdades en la condición basal y posterior a la implementación de una intervención o política pública para desarrollar un análisis de equidad (Schneider et al. 2002; Maguire and Sheriff 2011; Harper et al. 2013). En este contexto, las desigualdades sociales son las diferencias de los resultados en salud o exposición producto de la intervención, entre grupos poblacionales categorizados a priori según alguna característica importante de su posición socioeconómica (Schneider et al. 2002). Por lo tanto, la elección del indicador socioeconómico a utilizar en un análisis de desigualdad es fundamental, porque esta variable definirá los grupos y su ordenamiento en el análisis (Maguire and Sheriff 2011; Harper et al. 2013).

Las estadísticas de resumen y gráficos descriptivos, pueden proporcionar una descripción general de los datos y resultados utilizados en un análisis de desigualdades, entregando información útil sobre los patrones de disparidades con respecto a los resultados ambientales (Maguire and Sheriff 2011; Harper et al. 2013; Bacallao 2007). Por ejemplo, la información sobre las concentraciones de un contaminante específico entre distintos grupos de ingreso o raciales, proporciona

información de si el contaminante se distribuye uniformemente o no, lo cual puede acompañarse de alguna medida de comparación estadística (Maguire and Sheriff 2011). También se han descrito otras formas de evaluación de desigualdades a través de modelos de regresión, medidas de diferencias absolutas y relativas entre diferentes grupos socioeconómicos, entre otras (Maguire and Sheriff 2011; Schneider et al. 2002; Harper et al. 2013).

Existen otras herramientas para identificar la desigualdad en la distribución de resultados, especialmente desarrolladas en el contexto de ingresos y salud, sin embargo, su aplicación para clasificar los resultados de las políticas ambientales por sus impactos distributivos esta en desarrollo (Maguire and Sheriff 2011). Entre éstas se distinguen las herramientas de aplicación visual, como las curvas de Lorenz y de concentración, y los índices de desigualdad (Maguire and Sheriff 2011; O'Donnell et al. 2007).

Las curvas de Lorenz y de concentración, permiten determinar visualmente si una distribución de resultados es más “equitativa” que otra (Maguire and Sheriff 2011). Ambas son curvas de frecuencia acumulada que comparan la distribución empírica de una variable con su distribución uniforme, representada por una línea diagonal. Cuanto mayor es la distancia o el área comprendida entre la curva (de Lorenz o de concentración) y la diagonal, mayor es la desigualdad (Maguire and Sheriff 2011; Schneider et al. 2002; Bacallao 2007; O'Donnell et al. 2007).

Por otro lado, los índices de desigualdad, permiten resumir una distribución en un solo valor numérico, el cual se puede ordenar en relación a otro para compararlos en términos de la desigualdad. Dentro de los indicadores más utilizados en la evaluación de desigualdades se pueden encontrar: el Coeficiente de Gini, el Índice de concentración, el Índice de Atkinson y el Índice de Theil, basados en medidas de entropía; cada uno utiliza una construcción ligeramente diferente y se han descrito sus fortalezas y debilidades, no obstante, su frecuencia de uso se debe principalmente a su facilidad de interpretación (Harper et al. 2013; Maguire and Sheriff 2011). Obviamente, estos indicadores de desigualdad tendrán una mejor

interpretación si se evalúa la desigualdad de referencia en el contexto de la evaluación de una intervención de cualquier tipo.

En las intervenciones ambientales (como contaminación del aire), se requieren muchos avances en herramientas y teorías de investigación de la evaluación de desigualdades, especialmente, si se pretende considerar la equidad de los posibles impactos en la aplicación de intervenciones dirigidas a reducir la contaminación del aire en las zonas urbanas (Benmarhnia et al. 2014). En este sentido, si se carece de datos para caracterizar la distribución de los beneficios en salud correspondientes a una medida de regulación, los indicadores deben estar basados en la distribución de las exposiciones a contaminantes relevantes para la salud, determinando los cambios en la distribución como consecuencia de intervención aplicada (Harper et al. 2013).

La cuantificación de la desigualdad en los resultados de salud o en la exposición a riesgos o beneficios ambientales, es necesaria, pero no suficiente para determinar si existe o no una distribución inequitativa (Harper et al. 2013; Chan and Danzon 2005). Esto quiere decir que, si bien los indicadores cuantitativos son útiles para medir la desigualdad en los resultados de una intervención ambiental, un análisis de equidad o de justicia ambiental requiere la consideración de temas tan importantes como si la desigualdad observada es evitable, injusta, o subsanable, lo cual estaría más allá del alcance de este tipo de análisis cuantitativo (Harper et al. 2013). Finalmente, las evaluaciones y decisiones relativas a la inequidad dependen del discurso social, político y ético sobre lo que la sociedad cree que es injusto, y por tanto son considerablemente más difíciles de cuantificar (Harper et al. 2013).

## 6. Preguntas de investigación e hipótesis

### 6.1. Preguntas de investigación

¿La introducción de la reforma al transporte público “Transantiago”, ha tenido un impacto en la calidad del aire en Santiago, Chile?

¿Existen diferencias en el impacto de la reforma al transporte público, entre zonas de diferente nivel socioeconómico de Santiago, Chile?

### 6.2. Hipótesis

-La introducción de la reforma al transporte público “Transantiago” ha tenido un impacto en las concentraciones de los contaminantes del aire  $MP_{10}$ ,  $MP_{2,5}$ ,  $O_3$  y  $CO$  en Santiago, Chile

-El impacto de la reforma al transporte público se distribuye de forma diferencial entre zonas de diferente nivel socioeconómico de Santiago, Chile

## 7. Objetivos

### 7.1. Objetivo General

Estimar el impacto de la introducción de la reforma al transporte público “Transantiago” (TS) en la calidad del aire en Santiago, Chile y su distribución entre zonas de diferente nivel socioeconómico.

### 7.2. Objetivos Específicos

OE 1.- Describir las concentraciones de contaminantes y variables meteorológicas en Santiago durante el período previo y posterior a la introducción de la reforma al transporte público (TS).

OE 2.- Estimar el impacto de la introducción de la reforma al transporte público (TS) en la calidad del aire en Santiago, Chile.

OE 3.- Comparar los indicadores de calidad del aire y el impacto de TS entre zonas de Santiago, Chile según factores de estratificación social.

## 8. Métodos

### 8.1. Diseño de estudio

Se realizó un estudio ecológico mixto que utiliza los registros de concentraciones de contaminantes en un período de tiempo para distintas zonas geográficas de Santiago, Chile; incluyendo información y bases de datos secundarias desde fuentes oficiales del gobierno de Chile para 8 estaciones de monitoreo que cuentan con vigilancia de los niveles de contaminantes del aire previos al año 2007 (año de implementación de TS) y que cumplen con los criterios para ser EMRP mencionados en el capítulo 2.

Principalmente, se busca determinar el efecto del TS en la calidad del aire de Santiago, específicamente, en la concentración de 4 contaminantes ( $MP_{10}$ ,  $MP_{2,5}$ ,  $O_3$ ,  $CO$ ) con las siguientes características: su principal fuente antropogénica son las emisiones desde fuentes móviles, representan un peligro para la salud de las personas y existe una disponibilidad amplia de datos sobre sus concentraciones con la suficiente data temporal (que asegure tendencia) para llevar a cabo un análisis estadístico. El análisis de Series de Tiempo Interrumpidas (STI), seleccionado para evaluar el impacto, permite estimar el efecto de la intervención utilizando este enfoque observacional longitudinal.

### 8.2. Variables y fuentes de información

Se obtuvieron las concentraciones de todos los contaminantes criterio disponibles en el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire-SINCA (Ministerio del Medio Ambiente Gobierno de Chile n.d.), a saber:  $MP_{10}$ ,  $MP_{2,5}$ ,  $NO_2$ ,  $O_3$ ,  $SO_2$ ,  $CO$  (Tabla 3). Los instrumentos y formas de medición utilizados en la red de monitoreo han seguido las recomendaciones de la EPA de los Estados Unidos, tal como se muestra en la Tabla 3. Estas fueron obtenidas como concentraciones horarias, que es el menor nivel de agregación de tiempo disponible, considerando solo las mediciones validadas. Se obtuvieron los valores de las mediciones a partir del año 2001 si estaban disponibles, o posterior en el caso de las estaciones de monitoreo

que comenzaron a funcionar después de ese año, pero que disponen de mediciones previas al año 2007 (introducción del TS).

**Tabla 3. Contaminantes disponibles en las estaciones de monitoreo, fuente de información y características de la medición.**

Contaminantes	Fuente de información	Forma de medición	Tiempo y unidad de medición
MP <sub>10</sub>	SINCA	Atenuación Beta - MET ONE 1020	Horario (µg/m <sup>3</sup> )
MP <sub>2,5</sub>	SINCA	Atenuación Beta - MET ONE 1020	Horario (µg/m <sup>3</sup> )
NO <sub>2</sub>	SINCA	Quimioluminiscencia en fase gaseosa - THERMO 42i	Horario (ppb)
O <sub>3</sub>	SINCA	Fotometría UV - THERMO 49i	Horario (ppb)
SO <sub>2</sub>	SINCA	Fluorescencia pulsante - THERMO 43i	Horario (µg/m <sup>3</sup> )
CO	SINCA	Fotometría IR de filtro de correlación de gas- THERMO 48i	Horario (ppm)

Fuente: Elaboración propia en base a información del Sistema Nacional de Calidad del Aire (Ministerio del Medio Ambiente Gobierno de Chile n.d.)

Además, se obtuvo información de las siguientes variables meteorológicas (Tabla 4): valores horarios de temperatura (°C), humedad relativa (%) y velocidad del viento (m/s) desde la estación meteorológica asociada a la estación de monitoreo del SINCA. Los valores diarios de las precipitaciones (mm) se obtuvieron del Servicio meteorológico de la Armada de Chile, para toda la ciudad de Santiago.

**Tabla 4. Variables meteorológicas disponibles, fuente de información y características de la medición.**

Variable meteorológica	Fuente de información	Forma de medición	Tiempo y unidad de medición
Temperatura	SINCA	Sensor MET ONE HMP35A	Horario (°C)
Humedad Relativa	SINCA	Sensor MET ONE HMP35A	Horario (%)
Velocidad del viento	SINCA	Sensor MET ONE 020C	Horario (m/s)
Precipitaciones	Servicio Meteorológico de la Armada de Chile	Pluviómetro	Diario (mm)

Fuente: Elaboración propia en base a información del Sistema Nacional de Calidad del Aire (Ministerio del Medio Ambiente Gobierno de Chile n.d.)

Para cada una de las comunas que disponen de una estación de monitoreo, se obtuvo información acerca de diversos indicadores y variables de contexto social, basadas en el acrónimo PROGRESS, descritas en la Tabla 5.



**Tabla 5. Indicadores y variables de contexto social disponibles, fuente de información y año de medición.**

<b>Variable</b>	<b>Fuente</b>	<b>Año</b>
Puntaje y categoría de prioridad social	Ministerio de Desarrollo Social y Familia ( <a href="http://www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl/">www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl/</a> )	2007-2014
<b>VARIABLES DEMOGRÁFICAS</b>		
Proyección de población	Instituto Nacional de Estadísticas ( <a href="http://www.ine.cl">www.ine.cl</a> )	2007
Densidad de población (hab./Ha)	Instituto Nacional de Estadísticas	2002
Población < 14 años (%)	Instituto Nacional de Estadísticas	2007
Población > 65 años (%)	Instituto Nacional de Estadísticas	2007
Índice masculinidad	Instituto Nacional de Estadísticas	2007
Población urbana (%)	Instituto Nacional de Estadísticas	2002
Índice de desarrollo humano	Ministerio de Desarrollo Social y Familia	2006
Hacinamiento (%)	Encuesta Caracterización Socioeconómica Nacional (CASEN) ( <a href="http://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/casen">http://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/casen</a> )	2013
<b>VARIABLES SOCIOECONÓMICAS</b>		
Hogares (N° total)	Sistema Nacional de Información Municipal ( <a href="http://www.sinim.gov.cl">www.sinim.gov.cl</a> )	2002
Hogares con nivel de pobreza (%)	Encuesta Caracterización Socioeconómica Nacional (CASEN)	2006-2011
Ingreso per cápita mensual (miles \$)	Encuesta Caracterización Socioeconómica Nacional (CASEN)	2006-2013
<b>VARIABLES DE EDUCACIÓN</b>		
Años estudio total (promedio)	Sistema Nacional de Información Municipal	2002-2013
Pob. con título técnico (%)	Sistema Nacional de Información Municipal	2002
Pob. con título universitario (%)	Sistema Nacional de Información Municipal	2002
<b>VARIABLES DE ETNIA</b>		
Pob. perteneciente grupo étnico (%)	Instituto Nacional de Estadísticas, Encuesta Caracterización Socioeconómica Nacional (CASEN)	2002-2013
<b>VARIABLES DE SALUD</b>		
AVPP total (por 1000 hab.)	Departamento de Estadísticas e Información de Salud ( <a href="http://www.deis.cl">www.deis.cl</a> )	2005-2010
Tasa mortalidad <1 año (por 1000 NV)	Departamento de Estadísticas e Información de Salud	2011
<b>VARIABLES AMBIENTALES</b>		
Áreas verdes c/mantención (m <sup>2</sup> /hab.)	Sistema Nacional de Información Municipal	2005-2010
Pob. usa transporte público (%)	Sistema Nacional de Información Municipal	2007
Percepción calles mal estado (%)	Sistema Nacional de Información Municipal	2007
Satisfacción seguridad comuna (%)	Sistema Nacional de Información Municipal	2007
Satisfacción comuna (%)	Sistema Nacional de Información Municipal	2007
Tasa motorización (vehic/hab.)	Ministerio de Vivienda y Urbanismo ( <a href="http://www.observatoriourbano.minvu.cl">www.observatoriourbano.minvu.cl</a> )	2001-2012
Empresas (N° total)	Sistema Nacional de Información Municipal	2005-2010
Empresas con fuentes fijas de emisión (N° y % del total)	Sistema Nacional de Información Municipal	2005-2010

Fuente: Elaboración propia

Por último, los datos secundarios obtenidos desde las diferentes fuentes oficiales del gobierno, se consolidaron en 2 bases de datos, la primera contiene las concentraciones horarias de los contaminantes y las variables meteorológicas para

todas las estaciones de monitoreo y período de estudio (2001-2013), y la segunda, las variables sociodemográficas de las comunas que tienen disponible una estación de monitoreo.

### **8.3. Plan de análisis**

#### ***Análisis Exploratorio de Datos previo al cumplimiento de los objetivos***

El plan de análisis se desarrolló con una primera fase de ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo estudiadas y el análisis Exploratorio de los Datos (AED) obtenidos para cada estación de monitoreo con la finalidad de identificar datos faltantes o con errores de medición. Además, en esta fase se describen las tendencias temporales de los contaminantes y se prepara la base de datos que servirá para responder los objetivos de este estudio. Posteriormente, se desarrolló una segunda fase de análisis enfocada en dar respuesta a cada uno de los objetivos propuestos. Todos los análisis se realizaron con el software Stata 13 SE.

Se realizó el AED de las concentraciones horarias de todos los contaminantes criterio y variables meteorológicas provenientes de las estaciones de monitoreo con disponibilidad de datos previos al año de la implementación del TS ( $n=8$ ), en el período comprendido entre 2001 y 2013. A través del AED se constató la existencia de datos faltantes, por lo cual se realizó su imputación cuando éstos fueron inferiores al 10%, en cada estación de monitoreo por separado. La imputación se realizó utilizando suavizamiento exponencial doble (utilizando como semilla de arranque la mediana de la serie completa para cada contaminante) (Montgomery, Jennings, and Kulahci 2008).

Previo a la imputación de los datos faltantes, se realizó la descripción de las concentraciones horarias y diarias observadas de todos los contaminantes buscando variaciones horarias, semanales, mensuales y anuales, considerando las temporadas frías (abril-septiembre) y cálidas (octubre-marzo) para todo el período estudiado. Además, se describen las concentraciones horarias y diarias

observadas, para el período completo, entre las distintas estaciones de monitoreo para identificar la existencia de alguna diferencia entre las distribuciones.

Después de la imputación de los datos faltantes, para dar respuesta a los objetivos propuestos, se calcularon las medias móviles de las concentraciones horarias de 24 horas, para posteriormente generar una base de datos diaria que considera el valor promedio y máximo de 24 horas. En el caso de las variables meteorológicas se consideró principalmente el promedio diario. Solo en el caso de la temperatura, adicionalmente, se obtuvieron indicadores diarios de temperatura mínima y máxima.

La concentración promedio de 24 horas, se calculó siguiendo las indicaciones contenidas en la normativa de calidad de aire específica de cada contaminante, correspondiente a la media aritmética de los valores de concentración obtenidos en cada estación de monitoreo en 24 horas consecutivas. En caso de pérdida parcial de información horaria, el número de valores a considerar en el cálculo de la media, para que ésta sea válida, debe ser mayor o igual que el equivalente a 18 horas (D.S. N° 59/98 Ministerio Secretaría General de la Presidencia 1998; DS N°12/2012 Ministerio del Medio Ambiente 2012).

***OE 1.- Describir las concentraciones de contaminantes y variables meteorológicas en Santiago durante el período previo y posterior a la introducción de la reforma al transporte público (TS).***

Se realizó el análisis descriptivo de las concentraciones diarias de contaminantes y de las variables meteorológicas a través de medidas de tendencia central, de posición y de dispersión; además, se describe el número de veces que se supera el valor establecido en la normativa diaria de calidad de aire como frecuencia absoluta y relativa. La comparación de las variables descritas entre el período previo (2001-2006) y posterior (2008-2013) a la implementación de TS se realizó mediante test de Mann Whitney para las variables continuas y test Ji-cuadrado para las variables categóricas, para todas las mediciones y según estación de monitoreo.

Se calculó la media anual de los contaminantes  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$  para evaluar el cumplimiento de la normativa de calidad del aire de largo plazo. Para esto se utilizó la forma de cálculo descrita en las normativas correspondientes, cuya instrucción dice que primero se debe calcular la concentración mensual, que corresponde a la media aritmética de los valores de concentración de 24 horas en cada estación de monitoreo, en un mes calendario, y sólo se considerará como valor de concentración mensual válido, aquel que resulte de al menos el 75% de las mediciones validadas en un mes. Posteriormente, el cálculo de la concentración anual corresponde a la media aritmética de los valores de concentración mensual en cada estación de monitoreo, en un año calendario (D.S. N° 59/98 Ministerio Secretaría General de la Presidencia 1998; DS N°12/2012 Ministerio del Medio Ambiente 2012). Las concentraciones medias anuales de estos contaminantes se reportaron en gráficos para cada estación de monitoreo, para cada año de estudio.

Finalmente, se construyeron gráficos de serie de tiempo de las concentraciones diarias para una descripción gráfica de la tendencia en el tiempo y patrones estacionales de los contaminantes.

### ***OE 2.- Estimar el impacto de la introducción de la reforma al transporte público (TS) en la calidad del aire en Santiago, Chile.***

Para evaluar el impacto de la implementación “en una noche” de TS sobre los contaminantes estudiados se utilizó el análisis de Series de Tiempo Interrumpidas (STI) dado que se tienen datos de las variables dependientes tanto en el período previo como posterior a la intervención. Este tipo de análisis evalúa una serie de tiempo de un resultado particular de interés para establecer una tendencia subyacente, que es “interrumpida” por una intervención en un punto conocido en el tiempo, utilizando un enfoque de regresión segmentada para evaluar el efecto de la intervención en el resultado de interés (López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017; Linden 2015; Kontopantelis et al. 2015; Lagarde 2012). Para este análisis se consideraron como resultado de interés, los promedios y máximos mensuales de las concentraciones medias diarias de  $MP_{10}$ ,  $MP_{2,5}$ , CO y  $O_3$  para cada estación de monitoreo.

Un aspecto fundamental para considerar utilizar un análisis STI, es si se trata de un diseño apropiado para la evaluación del efecto de la intervención en la variable resultado, lo cual depende de la naturaleza de la intervención y del resultado de interés, así como del tipo de datos disponibles (Lagarde 2012; López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017; Shadish, Cook, and Campbell 2002).

En primer lugar, se evaluaron aquellos aspectos sugeridos por López-Bernal et al. para la utilización de un análisis de STI (López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017). La Tabla 6 muestra cada aspecto y su descripción en relación con la evaluación del impacto de la implementación del TS sobre las concentraciones de contaminantes.

**Tabla 6. Aspectos sugeridos por López-Bernal et al. para la utilización de un análisis de STI y su descripción en relación con la evaluación del impacto de la implementación del TS sobre las concentraciones de contaminantes.**

<b>Aspectos</b>	<b>Descripción de este estudio</b>
<p><i>Intervención</i></p> <p>STI requiere de una clara diferenciación del período previo y posterior a la intervención</p>	<p>La implementación del TS (intervención) fue en un solo día, comenzando a regir desde el 10 de febrero de 2007</p>
<p><i>Resultado de interés</i></p> <p>La variable de resultado o interés puede ser de varias formas: recuentos, datos continuos o variables binarias.</p> <p>STI funciona mejor con resultados de corto plazo que se espera que cambien con relativa rapidez después de que se implemente una intervención, o después de un retraso claramente definido.</p>	<p>Las concentraciones de los contaminantes del aire que se evalúan como resultado de interés corresponden a datos continuos. Se espera un efecto de la intervención hacia la disminución de las concentraciones de los contaminantes en el mediano-largo plazo con un inicio lento, principalmente porque el momento de la intervención fue en el mes de febrero (mes de vacaciones).</p>
<p><i>Requerimiento de datos</i></p> <p>Las mediciones secuenciales del resultado de interés deben estar disponibles tanto antes como después de la intervención. No hay límites fijos con respecto al número de puntos de datos</p>	<p>Se disponen datos de aproximadamente 6 años antes y 6 años después de la intervención, para las concentraciones mensuales de los contaminantes</p>
<p><i>Poder</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El poder aumenta con el número de puntos de datos en el tiempo, sin embargo, no siempre es preferible tener más puntos de datos ya que si las tendencias históricas han cambiado sustancialmente no proporcionarían una descripción precisa de las tendencias subyacentes actuales. Por lo que se recomienda que los datos previos a la intervención sean inspeccionados visualmente</li> <li>• El poder también aumenta si el número de puntos de datos se distribuye por igual antes y después de la intervención. Dado el requisito de una serie de tiempo relativamente larga, los datos de rutina son los más apropiados en los estudios de STI</li> </ul>	<p>Las tendencias de las concentraciones diarias de los contaminantes son inspeccionadas y descritas como parte del análisis del OE 1. Las tendencias de las concentraciones mensuales son inspeccionadas como primera etapa del análisis del OE 2; se dispone de alrededor de 72 puntos en el tiempo antes y después de la intervención.</p> <p>Todos los datos provienen del sistema de monitoreo de la vigilancia de la calidad del aire del Ministerio del Medio Ambiente.</p>
<p><i>Validez y fiabilidad de los datos</i></p> <p>Es importante conocer o evaluar la calidad de los datos en términos de su validez y fiabilidad. Con los datos de rutina, es conveniente investigar los cambios en el registro de los datos o su forma de medición, especialmente si los cambios coinciden con la implementación de la intervención, ya que esto podría sesgar los resultados.</p>	<p>Para este estudio se utilizaron solo los datos validados de las concentraciones de contaminantes en cada estación de monitoreo. No se registraron cambios en el registro de datos ni en la forma de medición durante el período estudiado.</p>

Fuente: Elaboración propia

En segundo lugar, López-Bernal et al. sugieren que previo al análisis de modelamiento se realicen análisis descriptivos más tradicionales, con estadísticas

de resumen y comparaciones bivariadas simples de la variable de resultado y los posibles factores de confusión variables en el tiempo, entre el período previo y posterior a la implementación de la intervención (López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017; Shadish, Cook, and Campbell 2002; Bhaskaran et al. 2013). También recomiendan incluir gráficos de dispersión de la serie temporal, que pueden ayudar a identificar, de manera descriptiva, la tendencia subyacente y los patrones estacionales (López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017; Bhaskaran et al. 2013). Un primer análisis descriptivo de la serie completa fue detallado en el plan de análisis del OE 1, mientras que el análisis descriptivo de los valores mensuales, que se utilizarán para realizar el análisis de STI, se detalla en esta sección como parte de los pasos a seguir en dicho análisis. Se reportarán medidas de resumen de las concentraciones mensuales de los contaminantes (promedios y máximos mensuales de las concentraciones diarias), así como de las variables climáticas, comparando el período previo y posterior a la implementación de TS, según estación de monitoreo. Además, se presentarán gráficos de dispersión de la serie temporal para cada contaminante según estación de monitoreo.

En tercer lugar, se realizó el análisis STI cuyo modelo utilizado es el siguiente (López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017; Linden 2015):

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 X_t + \beta_3 TX_t + \varepsilon_t$$

Donde:

$Y_t$ : es la variable de interés en cada punto de tiempo  $t$ , en este caso son las concentraciones mensuales de cada contaminante específico en una estación de monitoreo;

$T$ : es la variable de tiempo desde el comienzo hasta el final del estudio, en este caso desde enero de 2001 hasta diciembre de 2013;

$\beta_0$ : es el intercepto o nivel basal de la variable de interés cuando  $T = 0$ ;

$\beta_1$ : es la pendiente previa a la intervención, se interpreta como el cambio en la variable de interés asociado al aumento de la unidad de tiempo hasta la introducción de la intervención (representa la tendencia pre-intervención);

$\beta_2$ : es el cambio en el nivel de la variable de interés inmediatamente después de la intervención;

$X_t$ : es una variable binaria que especifica el período pre-intervención (0) o post-intervención (1), en este caso se consideró que la intervención fue implementada en el mes de febrero de 2007 (representando el primer mes de la intervención);

$\beta_3$ : indica el cambio en la pendiente post-intervención;

$TX_t$ : es la interacción entre tiempo  $T$  e intervención  $X_t$

$\varepsilon_t$ : es el error aleatorio

El modelo a utilizar es el de Newey, que estima los coeficientes por mínimos cuadrados ordinarios (MCO) y produce errores estándar de Newey-West (López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017; Linden 2015), debido a que se ha descrito que es un modelo muy flexible y ampliamente aplicable en un análisis de series de tiempo interrumpido. Se utilizó un modelo basal que incluyó solo los elementos asociados a la intervención, anteriormente descritos. Para evaluar la significación estadística en el modelo basal y los modelos ajustados se consideró un nivel de significación del 5%.

En este paso, además, se formuló la hipótesis estadística sobre cómo la intervención tendría un impacto en el resultado, si este fuera efectivo. En este caso se propuso que la intervención (introducción de TS), principalmente, tendrá un cambio en la tendencia de las concentraciones de contaminantes posterior a la intervención, por lo tanto, se formulan las siguientes hipótesis estadísticas:

$H_0$ : La introducción de TS no produce un cambio en la pendiente de la concentración del contaminante posterior a la intervención ( $H_0: \beta_3=0$ )

$H_1$ : La introducción de TS produce un cambio en la pendiente de la concentración del contaminante posterior a la intervención ( $H_0: \beta_3\neq 0$ )

Secundariamente, se evaluará si la introducción de TS produjo un cambio en el nivel de los contaminantes estudiados inmediatamente después de su implementación, aunque se espera que este efecto no sea tan marcado,



principalmente porque el momento de la intervención fue en el mes de febrero (último mes de vacaciones). En este caso, se formulan las siguientes hipótesis estadísticas:

H<sub>0</sub>: La introducción de TS no produce un cambio en el nivel del contaminante posterior a la intervención (H<sub>0</sub>:  $\beta_2=0$ )

H<sub>1</sub>: La introducción de TS produce un cambio en el nivel del contaminante posterior a la intervención (H<sub>0</sub>:  $\beta_2\neq 0$ )

En cuarto lugar, se evaluaron los problemas metodológicos descritos en la revisión de la literatura que deben ser considerados en un análisis de STI, y de esta manera mejorar la solidez del análisis. Por lo tanto, en base al modelo basal se evaluó la autocorrelación de los errores, para ajustar un modelo que considere los patrones estacionales, la autocorrelación y los posibles factores de confusión variables en el tiempo.

Es conocido que las concentraciones de contaminantes del aire tienen un patrón estacional, generalmente con concentraciones más elevadas en los meses fríos y menores en los meses cálidos (Jhun et al. 2013). Una observación realizada por López-Bernal et al. indica que la distribución desigual de meses antes y después de la intervención en una serie de tiempo con patrón estacional, puede sesgar los resultados especialmente si la serie de tiempo es corta (López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017), por esta razón, los análisis se realizaron considerando 72 meses antes y 72 meses después de la intervención.

Por otro lado, como en los datos de series de tiempo las observaciones consecutivas tienden a ser más similares entre sí que las que están más separadas (autocorrelación), se evaluó la autocorrelación de la distribución de los errores del modelo basal a través del test de auto-correlación de Cumby-Huizinga (Cumby and Huizinga 1992) considerando hasta 12 rezagos, y mediante gráficos de las funciones de autocorrelación y de autocorrelación parcial (López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017; Linden 2015; Jebb et al. 2015). Metodológicamente, la

presencia de autocorrelación puede invalidar el uso de herramientas estadísticas, como, por ejemplo, el uso de modelos de regresión obtenidos por el método de mínimos cuadrados ordinarios, ya que infringe el supuesto de que los términos de error no están correlacionados. Si bien esto no sesga las estimaciones de los coeficientes del modelo, los errores estándar tienden a subestimarse, lo que podría llevar a conclusiones sesgadas sobre la significación estadística de algunos coeficientes (Lagarde 2012; Jebb et al. 2015).

Al identificar la presencia de autocorrelación en los errores del modelo basal de STI, lo primero que se controló fue la estacionalidad, debido a que ésta frecuentemente explica gran parte de la autocorrelación. La estacionalidad se controló utilizando e incluyendo en el modelo de STI los términos de Fourier (pares de funciones seno y coseno) que son funciones complejas que permiten describir el patrón de fluctuaciones observadas a través de los períodos (López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017; Jebb et al. 2015), considerando los efectos estacionales con una variación suave y continua, proporcionando un modelo más realista de cambio estacional (Jebb et al. 2015), especialmente en series de tiempo extensas (Bhaskaran et al. 2013).

Posterior a este ajuste, nuevamente se evaluó la autocorrelación de los residuos del modelo ajustado utilizando las mismas herramientas estadísticas. A partir de esta segunda evaluación, se decidió si el modelo podía ser usado con confianza o si se debía agregar algún rezago o algún factor de confusión que varíe en el tiempo (López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017; Jebb et al. 2015; Linden 2015). Si después del ajuste, los residuos seguían mostrando un proceso autorregresivo, de modo que el error de un mes determinado dependía de los errores de los meses anteriores se agregó un rezago de acuerdo al proceso autorregresivo identificado (Jebb et al. 2015).

Finalmente, se consideraron los factores de confusión que varían con el tiempo. Una categoría especial de éstos, son otros eventos que ocurren al mismo tiempo que la intervención y que potencialmente influyen en el resultado (Lagarde 2012;

López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017; Kontopantelis et al. 2015), si bien no se identificaron eventos que ocurrieron al mismo tiempo de la intervención, es posible que la intervención haya influido en algunas conductas que podrían afectar el resultado. Esto será analizado en la sección de discusión. Por otro lado, las variables climáticas también podrían influir en el resultado, por lo que serán controladas mediante la inclusión de variables que las representen en el modelo, tal como se realiza comúnmente en otros análisis de modelamiento (Lagarde 2012; López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017).

### ***OE 3.- Comparar los indicadores de calidad del aire y el impacto de TS entre zonas de Santiago, Chile según factores de estratificación social.***

Se realizó una descripción de los indicadores y variables de contexto social detallados en la Tabla 5, para todas aquellas comunas en las cuales se hallan geográficamente las estaciones de monitoreo incluidas en el estudio. Los factores de estratificación social considerados en la descripción están basados en el acrónimo PROGRESS, detallado en el capítulo 5.

Para evaluar las desigualdades a través de las diferencias en la calidad del aire y del impacto del TS entre las estaciones de monitoreo, se compararon los resultados en los indicadores de calidad del aire (previo y posterior a la introducción de la intervención) y los coeficientes obtenidos en el modelo STI, a través del Índice de Prioridad Social (IPS) de cada comuna monitoreada. El IPS es un indicador compuesto que integra aspectos relevantes del desarrollo social comunal que incluye las dimensiones de ingresos, educación y salud; cuyo valor numérico es un índice sintético que permite dimensionar el nivel de vida relativo alcanzado en un momento del tiempo por la población de una comuna (Secretaría Regional Ministerial de Desarrollo Social 2014). Un valor alto en el IPS indica un bajo nivel de vida en la comuna y una mayor prioridad en términos de su desarrollo social.

Este análisis se realizó para los resultados en los contaminantes MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub>, y los indicadores de calidad del aire y resultados del modelo STI considerados fueron los siguientes:

- i. **Concentraciones diarias:** comparación descriptiva mediante gráficos de cajas de las concentraciones previas y posteriores a la introducción de TS a través del IPS de cada comuna para los contaminantes  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$ . Además, se aplicó el test no paramétrico de Kruskal-Wallis para la comparación de las concentraciones de los contaminantes entre los IPS de las comunas.
- ii. **Días de calidad del aire no saludable:** distribución del número de días en que se supera el estándar chileno de  $MP_{10}$  ( $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y  $MP_{2,5}$  ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) según la comuna de ubicación de la estación de monitoreo, para el período previo y posterior a la introducción de TS.
- iii. **Días de calidad del aire saludable:** distribución del número de días en que no se supera el valor recomendado por la OMS para  $MP_{10}$  ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y  $MP_{2,5}$  ( $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) según la comuna de ubicación de la estación de monitoreo, para el período previo y posterior a la introducción de TS.
- iv. **Coeficientes del modelo STI:** comparación descriptiva de los coeficientes según IPS de cada comuna para los resultados en los contaminantes  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$ .

Para los indicadores ii, iii y para el coeficiente correspondiente a la tendencia posterior a la intervención, se calculó el **Índice de concentración (IC)** con el propósito de cuantificar la desigualdad en la distribución de los indicadores. Se optó por el IC dado que, para su cálculo, las unidades de observación se deben ordenar según una variable socioeconómica o de nivel de vida, desde la peor a la mejor situación y, además, se requiere conocer el tamaño de cada grupo para realizar el cálculo de la frecuencia relativa y acumulada según la variable socioeconómica (Schneider et al. 2002; Bacallao 2007; O'Donnell et al. 2007; Maguire and Sheriff 2011). Para este análisis las unidades de observación correspondientes a las comunas donde se ubica cada estación de monitoreo, se ordenaron según el índice de prioridad social y el tamaño del grupo correspondió a la población de cada comuna.

El IC permitió contestar la pregunta: ¿Cómo se distribuyen los indicadores de calidad del aire y el coeficiente de la tendencia post intervención entre las comunas donde se ubican las estaciones de monitoreo en relación con su situación socioeconómica (según el índice de prioridad social)?

Para el cálculo del IC se utilizó la fórmula de Brown (Schneider et al. 2002; O'Donnell et al. 2007):

$$IC = 1 - \sum_{i=0}^{k-1} (Y_{i+1} + Y_i)(X_{i+1} - X_i)$$

Donde,  $k$  es el número de unidades de observación,  $X_i$  es la frecuencia acumulada de la población del grupo  $késimo$  (ordenado según la variable socioeconómica) e  $Y_i$  es la frecuencia acumulada de los indicadores de calidad del aire en el grupo  $késimo$ .

El IC puede tomar valores entre -1 y +1, donde los valores más cercanos a -1 indican que la mayor parte del resultado lo soporta el grupo con peor posición socioeconómica, los valores más cercanos a 1 indican que la mayor parte del resultado lo soporta el grupo con mejor posición socioeconómica y los valores más cercanos a 0 indican menor desigualdad (Schneider et al. 2002; Maguire and Sheriff 2011; O'Donnell et al. 2007).

Además, se graficó la **curva de concentración** que está directamente relacionada con el IC calculado. La curva de concentración es una curva de frecuencia acumulada que compara la distribución empírica de una variable con la distribución uniforme, representada por una línea diagonal de equidistribución. El valor del IC corresponde al doble del área entre la curva de concentración y la diagonal de equidistribución (Schneider et al. 2002; Bacallao 2007). Cuanto mayor sea el área comprendida entre la curva de concentración y la diagonal, mayor es la desigualdad. Para los indicadores ii y iii, se graficaron las curvas de concentración tanto para el período pre como post intervención y así hacer la comparación entre ambas curvas.

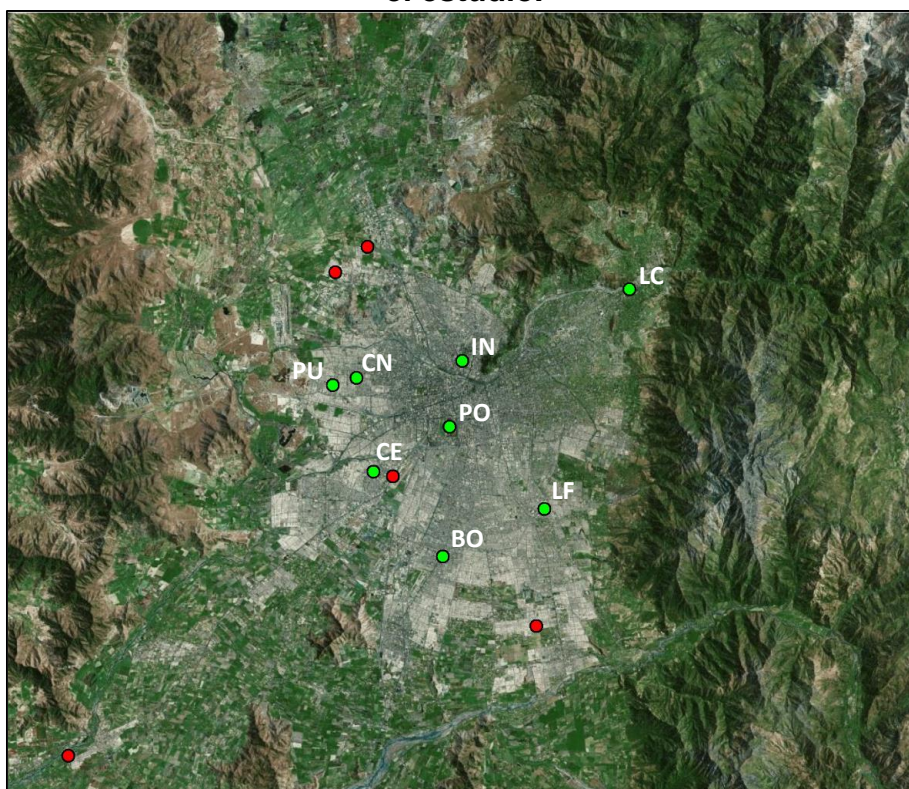
## 9. Resultados

### 9.1. Análisis Exploratorio de Datos previo al cumplimiento de objetivos

La distribución espacial de las estaciones de monitoreo incluidas en el estudio se muestran en la Figura 4. Las estaciones de monitoreo incluidas fueron: **El Bosque (BO)**, **Cerrillos (CE)**, **Cerro Navia (CN)**, **Independencia (IN)**, **Las Condes (LC)**, **La Florida (LF)**, **Parque O'Higgins (PO)** y **Pudahuel (PU)**. La estación PO es la única que no tiene el nombre de la comuna donde está ubicada, que es la comuna de Santiago, no obstante, se seguirá mencionando con el nombre de PO en representación de dicha comuna.

La estación PO ha sido descrita como la estación de monitoreo más representativa de Santiago, debido a su ubicación central dentro de la ciudad (Osses, Gallardo, and Faundez 2013), no obstante, las otras estaciones entregan valiosa información sobre la variabilidad en la distribución de los contaminantes a través de otros sectores de Santiago, lo cual permite el estudio de la distribución de la exposición a los contaminantes en forma territorial y los posibles factores vinculados. Los datos de las estaciones de monitoreo incluyen 6 años antes y 6 años después de la introducción del TS (2007), es decir, el período de 2001 a 2013.

**Figura 4. Distribución espacial de las estaciones de monitoreo incluidas en el estudio.**



Fuente: Elaboración propia en base a información del Sistema Nacional de Calidad del Aire. Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU)

En el AED de los datos horarios de las 8 estaciones de monitoreo, no se encontraron valores duplicados, aunque se pudo constatar diferentes estados de completitud de los datos.

Las Tablas 7 y 8 muestran el porcentaje de completitud anual de los datos de las concentraciones horarias para cada estación de monitoreo. Es importante recordar que para todos los análisis propuestos en esta tesis se han utilizado exclusivamente datos validados.

**Tabla 7. Porcentajes de completitud anual de los datos de concentraciones horarias de MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> según estación de monitoreo.**

<b>MP<sub>10</sub></b>													
	2001	2002	2003	2004*	2005	2006	2007	2008*	2009	2010	2011	2012*	2013
<b>BO</b>	99,7	99,3	99,5	98,7	99,2	99,2	99,5	99,0	99,7	99,0	98,1	98,6	99,4
<b>CE</b>	98,7	96,8	97,8	99,7	99,6	97,9	99,4	99,2	98,7	96,7	98,5	99,6	99,7
<b>CN</b>	<b>44,6</b>	<b>83,2</b>	97,3	98,8	99,0	99,5	98,8	98,9	99,5	98,5	99,7	99,6	99,2
<b>IN</b>	99,7	99,3	99,3	99,5	99,7	99,8	99,4	99,6	95,3	97,1	98,4	98,4	99,2
<b>LC</b>	99,3	99,5	99,6	99,0	99,7	99,3	99,6	99,3	98,6	99,6	99,3	97,9	99,2
<b>LF</b>	99,3	99,0	99,6	99,3	99,6	99,6	99,5	98,9	99,4	98,3	99,2	98,8	98,5
<b>PO</b>	98,3	98,2	98,6	96,7	98,7	98,8	99,1	98,6	99,1	97,8	97,4	98,7	99,3
<b>PU</b>	99,5	98,3	99,5	99,0	99,4	97,3	98,8	99,1	99,0	97,3	98,4	99,2	99,4
<b>MP<sub>2,5</sub></b>													
<b>BO</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	99,6	98,9	99,0	98,2	99,3
<b>CE</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	97,6	95,3	96,9	99,3	98,7
<b>CN</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	99,7	98,7	99,7	99,6	99,5
<b>IN</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	95,4	97,2	98,0	98,4	98,9
<b>LC</b>	94,2	98,9	99,3	99,5	99,1	99,3	99,7	97,9	99,0	99,5	99,6	97,8	99,1
<b>LF</b>	99,1	98,9	98,7	98,9	99,2	99,2	99,3	99,2	99,6	98,0	98,9	98,6	97,9
<b>PO</b>	<b>66,1</b>	97,9	98,1	97,6	94,3	98,3	98,9	97,3	99,2	97,8	97,5	98,6	98,7
<b>PU</b>	<b>47,6</b>	98,0	99,3	98,4	99,3	98,3	98,8	99,1	99,3	96,2	98,4	99,1	99,8

Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU)\*año bisiesto considera 8784 horas (año normal: 8760 horas); en azul porcentajes de completitud menores a 90%

En la Tabla 7, se puede observar que el MP<sub>10</sub> presenta un alto grado de completitud de los datos horarios (>90%). La estación CN fue la única que tuvo una baja completitud durante los años 2001 y 2002, lo cual se debe a que comenzó a medir este contaminante en marzo del año 2001 y durante los 2 primeros años de funcionamiento presentó frecuentes registros no validados. Por otra parte, el MP<sub>2,5</sub> fue medido durante el período previo al 2007 sólo por 4 estaciones de monitoreo (LC, LF, PO, PU) con un alto grado de completitud de los datos.

En la Tabla 8 se puede observar que, en general, para el NO<sub>2</sub> no hubo mediciones previas al año 2007, para el SO<sub>2</sub> hubo solo 3 estaciones con mediciones para el período posterior a 2007, y en el caso de O<sub>3</sub> y CO se dispone de mediciones para el período previo y posterior a 2007. La completitud para los años que disponían de datos, fue alta (>90%) en la mayoría de los casos.



**Tabla 8. Porcentajes de completitud anual de los datos de concentraciones horarias de los gases NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y CO según estación de monitoreo.**

<b>NO<sub>2</sub></b>													
	2001	2002	2003	2004*	2005	2006	2007	2008*	2009	2010	2011	2012*	2013
<b>BO</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>77,3</b>	96,4	97,5	99,0	93,2
<b>CE</b>	0	0	0	0	0	96,1	<b>66,9</b>	99,6	99,4	97,1	98,0	99,1	99,8
<b>CN</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>78,3</b>	99,1	99,4	98,5	98,6
<b>IN</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>52,8</b>	97,7	91,4	98,2	97,6
<b>LC</b>	0	0	0	0	0	99,3	95,2	99,7	97,4	99,7	99,4	99,1	99,8
<b>LF</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>73,2</b>	98,5	99,2	<b>88,8</b>	92,1
<b>PO</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>69,1</b>	95,1	97,4	99,4	99,4
<b>PU</b>	0	0	0	0	0	97,4	93,7	96,8	99,7	97,9	98,7	99,1	<b>81,4</b>
<b>SO<sub>2</sub></b>													
<b>BO</b>	99,8	96,3	98,7	<b>84,1</b>	99,4	99,8	99,6	98,3	98,5	<b>89,6</b>	97,1	97,7	99,8
<b>CE</b>	96,2	97,2	98,6	99,5	99,9	95,7	99,4	96,8	0	0	0	0	0
<b>CN</b>	<b>65,0</b>	95,5	<b>27,6</b>	99,6	99,6	99,6	98,9	94,2	0	0	0	0	0
<b>IN</b>	<b>80,8</b>	<b>87,5</b>	99,5	99,9	99,5	99,4	99,7	98,8	95,2	97,8	96,8	96,6	97,2
<b>LC</b>	98,1	97,2	<b>82,2</b>	97,2	98,4	<b>77,3</b>	99,8	96,8	0	0	0	0	0
<b>LF</b>	99,4	93,4	98,7	99,4	<b>40,3</b>	<b>67,8</b>	99,5	99,6	96,4	91,0	95,2	<b>79,1</b>	99,0
<b>PO</b>	97,9	98,5	91,7	97,3	98,1	95,8	99,0	98,8	95,9	94,6	<b>77,5</b>	0	0
<b>PU</b>	99,4	93,8	96,3	98,2	99,4	98,9	99,2	99,5	0	0	0	0	0
<b>O<sub>3</sub></b>													
<b>BO</b>	97,3	99,5	97,4	98,8	99,5	98,5	<b>89,6</b>	99,4	98,7	99,9	99,3	99,3	99,7
<b>CE</b>	99,0	96,0	98,3	<b>78,3</b>	99,6	99,1	99,6	99,8	99,6	97,4	99,0	95,8	<b>88,6</b>
<b>CN</b>	<b>58,9</b>	90,8	97,2	99,7	99,6	99,7	97,2	99,3	99,6	99,2	99,7	99,8	97,2
<b>IN</b>	98,9	97,7	99,9	99,8	98,8	92,2	96,9	99,8	95,5	97,8	99,3	98,2	98,1
<b>LC</b>	99,4	98,4	98,3	99,7	99,8	96,7	98,9	99,8	99,5	100	99,7	99,0	99,3
<b>LF</b>	97,6	99,4	99,6	99,1	97,9	97,6	99,5	99,6	100	95,7	99,5	99,1	98,9
<b>PO</b>	99,0	98,2	98,1	98,1	92,5	99,3	99,2	99,0	99,8	98,6	98,4	96,0	99,1
<b>PU</b>	99,6	94,7	98,2	99,3	99,7	99,2	90,9	99,5	99,8	98,1	98,9	97,7	98,8
<b>CO</b>													
<b>BO</b>	99,8	95,5	98,3	99,4	99,4	99,6	98,7	96,4	99,7	99,8	98,4	99,1	98,1
<b>CE</b>	99,0	97,3	96,5	98,4	98,5	98,9	<b>89,8</b>	95,5	97,6	97,0	97,6	99,2	99,8
<b>CN</b>	<b>69,0</b>	<b>85,2</b>	98,1	99,6	99,7	96,4	94,3	96,3	99,3	96,8	99,1	99,9	99,6
<b>IN</b>	100	99,8	94,4	99,9	93,9	99,3	99,6	99,4	94,8	97,3	99,3	97,9	97,7
<b>LC</b>	98,4	99,7	93,7	94,3	100	99,7	98,7	99,8	99,4	99,9	99,7	99,1	99,8
<b>LF</b>	99,7	98,4	99,7	99,5	99,8	99,6	95,1	98,6	99,7	98,1	99,3	98,3	97,2
<b>PO</b>	98,9	92,2	99,0	96,7	97,9	<b>83,1</b>	97,5	98,5	99,6	97,3	98,2	99,0	99,5
<b>PU</b>	99,6	98,5	95,6	99,3	99,7	96,9	99,3	99,5	99,5	97,5	98,8	94,1	98,3

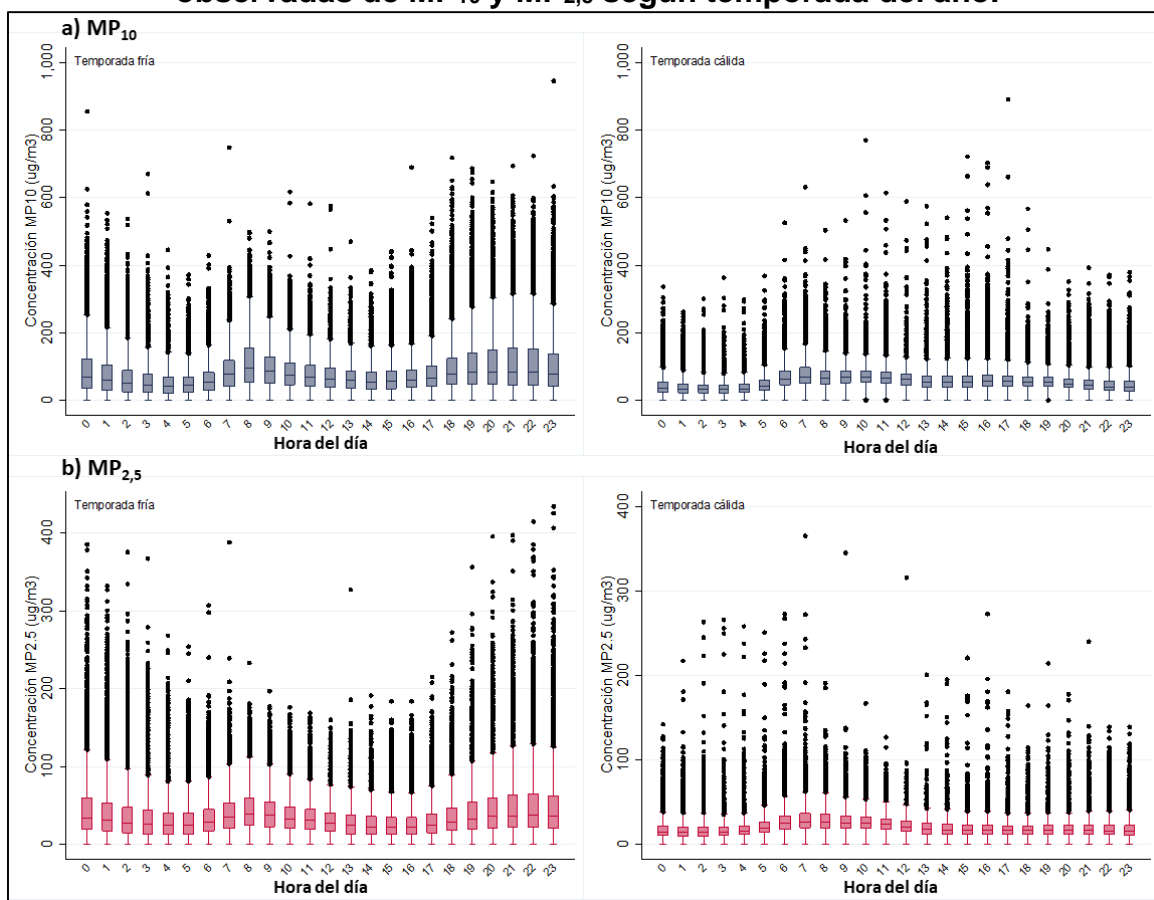
Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU)\*año bisiesto considera 8784 horas (año normal: 8760 horas); en azul porcentajes de completitud menores a 90%

En resumen, los contaminantes MP<sub>10</sub>, O<sub>3</sub> y CO tuvieron datos disponibles para toda la serie de tiempo estudiada en las 8 estaciones y, en general, mostraron buena completitud de los datos (<10% datos horarios perdidos). Solo 4 estaciones de monitoreo tuvieron datos de MP<sub>2,5</sub> para toda la serie de tiempo mostrando una buena completitud de los datos. Los contaminantes NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>, tuvieron períodos largos sin datos (pre o post intervención) en la mayoría de las estaciones de monitoreo.

### ***Variación según hora del día de las concentraciones horarias de contaminantes según temporada***

La Figura 5 muestra la distribución de los datos observados de las concentraciones horarias de los contaminantes MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> durante el día. El MP<sub>10</sub> muestra mayores concentraciones durante las mañanas (7 a 9 AM) y durante las tardes (17 a 20 PM), lo que corresponde a los horarios de mayor tráfico vehicular debido a la entrada y salida de colegios y trabajos (Gallego, Montero, and Salas 2013). Esta distribución es similar en la temporada fría, en cambio, en la temporada cálida hubo menores concentraciones y las más altas se observaron durante las tardes (15 a 17 PM). El MP<sub>2,5</sub> mostró mayores concentraciones durante la noche (19 PM a 2 AM) en la temporada fría. En la temporada cálida hubo menores concentraciones, y las más altas se registraron durante la madrugada (2 a 7 AM).

**Figura 5. Variación según hora del día de las concentraciones horarias observadas de MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> según temporada del año.**

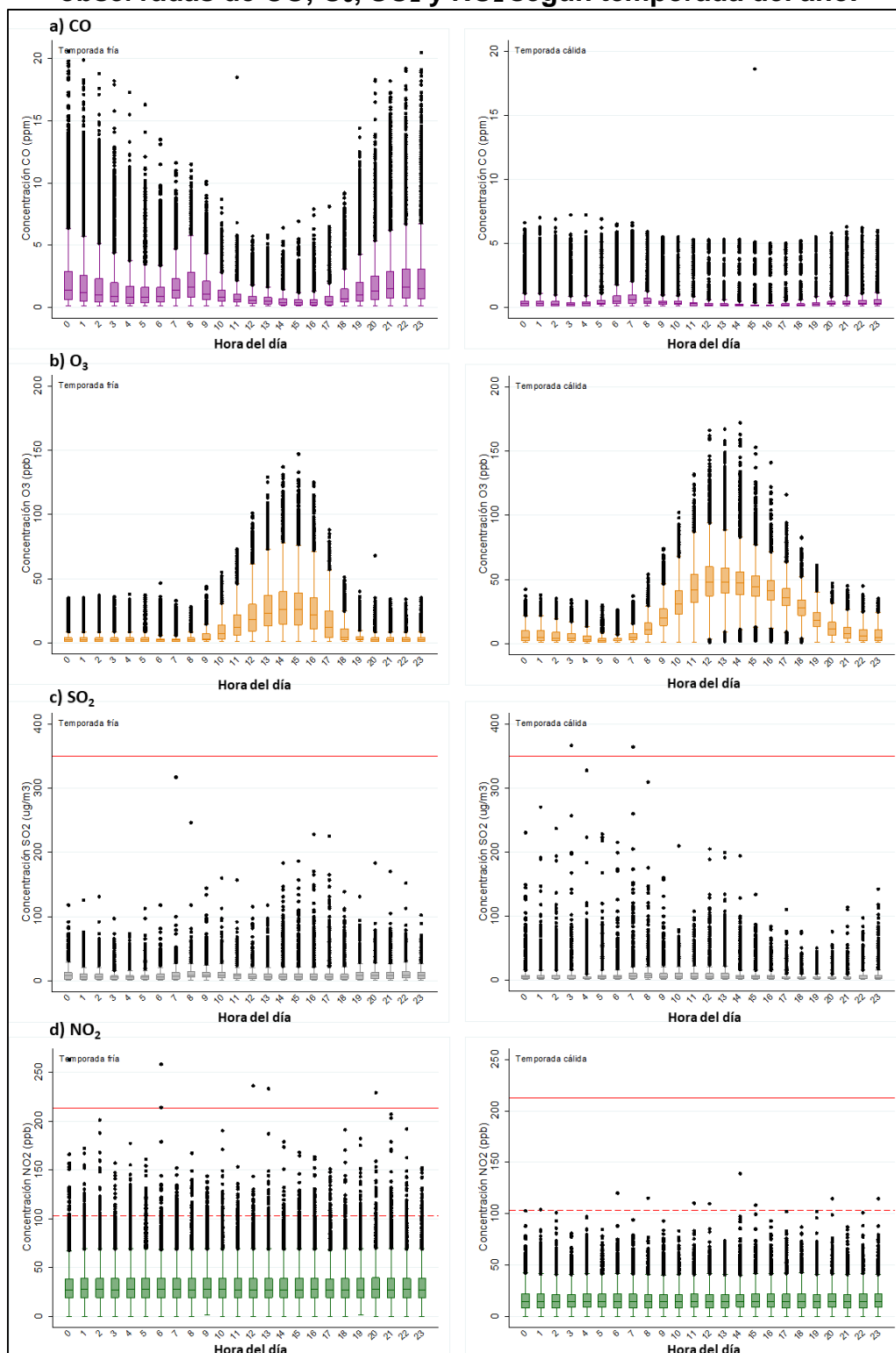


Temporada fría (izquierda): abril-septiembre, Temporada cálida (derecha): octubre-marzo.

La Figura 6 muestra la distribución de los datos observados de las concentraciones horarias de los gases contaminantes CO, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> durante las horas del día. El CO en la temporada fría mostró concentraciones muy superiores que la temporada cálida, con predominio de las concentraciones altas durante las tardes y noches (20 PM a 5 AM), y un leve aumento durante la mañana (7 a 9 AM); en cambio, en la temporada cálida no hubo predominio por ninguna hora del día. La normativa horaria para el contaminante CO (26 ppm) no mostró superaciones. El O<sub>3</sub> mostró una distribución similar y previsible en ambas temporadas con mayores concentraciones durante el día, con un pico en los horarios de mayor radiación solar (12 a 15 PM) debido a que este es un contaminante secundario que se forma en presencia de luz solar. El SO<sub>2</sub> mostró mayores concentraciones horarias en la temporada cálida durante la madrugada (2 a 7 AM), en cambio en temporada fría se observaron mayores concentraciones durante la tarde (14 a 18 PM). La

normativa horaria de SO<sub>2</sub> (350 µg/m<sup>3</sup>) solo fue superada en 2 ocasiones, durante la temporada cálida. El NO<sub>2</sub> no mostró predominancia por alguna hora del día, no obstante, las concentraciones en la temporada cálida fueron bastante inferiores que las registradas en temporada fría, donde las superaciones de la normativa horaria chilena (213 ppb) para este contaminante fueron poco frecuentes (6 superaciones). Sin embargo, el valor recomendado por la OMS (103 ppb) es superado constantemente durante todo el día en la temporada fría.

**Figura 6. Variación según hora del día de las concentraciones horarias observadas de CO, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> según temporada del año.**



Temporada fría (izquierda): abril-septiembre, Temporada cálida (derecha): octubre-marzo.

Línea continua: estándar horario chileno (NO<sub>2</sub>: 213 ppb, SO<sub>2</sub>: 350 µg/m<sup>3</sup>, CO: 26 ppm); línea punteada: valor guía OMS (NO<sub>2</sub>: 103 ppb, CO: 26 ppm)

### Concentraciones horarias de contaminantes según estación de monitoreo

Las medidas de resumen de las concentraciones horarias observadas para todo el período de estudio según estación de monitoreo se presentan en la Tabla 9, en la cual se puede observar que existe amplia variabilidad en las medianas de las concentraciones de los contaminantes entre las 8 estaciones de monitoreo, excepto para el contaminante CO. La estación LF registró las mayores medianas tanto para MP<sub>10</sub> como MP<sub>2,5</sub> y la estación LC mostró las medianas más bajas. En el caso del NO<sub>2</sub> los mayores valores se registraron en las estaciones BO e IN, no obstante, las 6 superaciones de la normativa horaria se registraron en la estación PU; las menores medianas de este contaminante se registraron en CE y CN. Las estaciones CE y CN mostraron las mayores medianas de concentraciones horarias de SO<sub>2</sub> para todo el período y las 3 superaciones de la normativa se registraron en BO. Las mayores medianas de concentraciones horarias de O<sub>3</sub> se observaron en las estaciones CE y PU. Las medianas de las concentraciones de CO fueron similares en todas las estaciones de monitoreo para todo el período de estudio y no se registraron superaciones de la normativa.

**Tabla 9. Mediana y rango intercuartil de las concentraciones horarias observadas de todos los contaminantes según estación de monitoreo.**

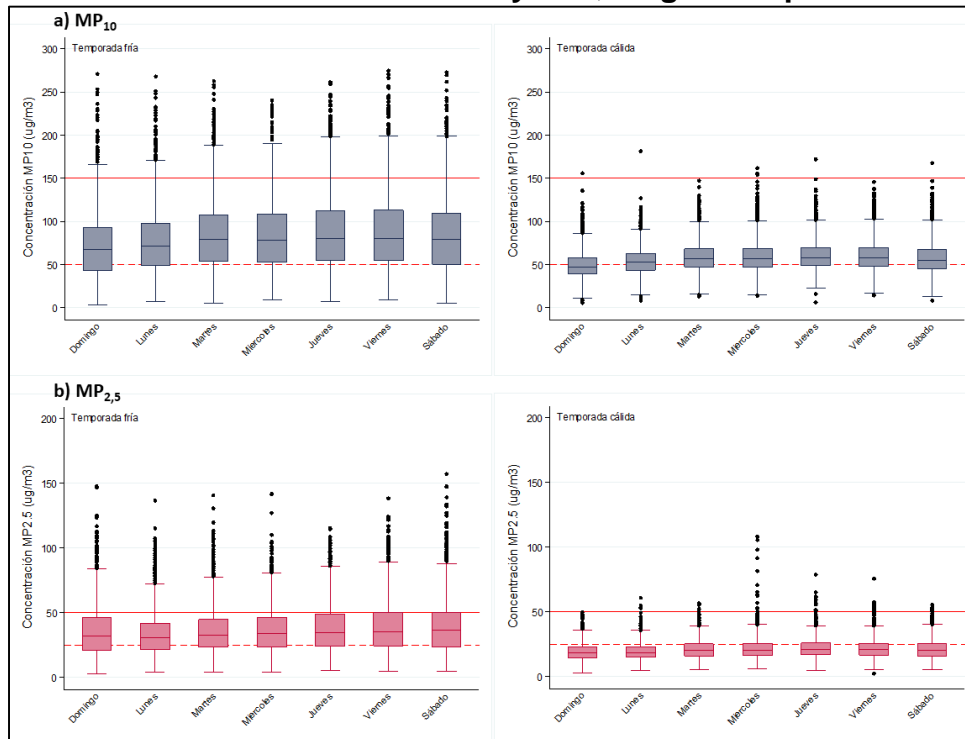
Concentraciones horarias observadas								
	BO	CE	CN	IN	LC	LF	PO	PU
	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )
MP <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	63 (41-95)	58,5 (36-90)	57 (36-94)	58 (38-85)	45 (27-69)	62 (41-92)	60 (37-89)	55 (35-85)
MP <sub>2,5</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	22 (14-36)	21 (14-35)	19 (12,4-33)	22 (14-33)	20 (13-31)	26 (17-40)	25 (16-40)	21 (14-36)
NO <sub>2</sub> (ppb)	22 (13,7-32,3)	18 (9,2-29,6)	18 (10-27,6)	29,2 (19,9-41)	21,7 (14-32)	20,3 (13,4-29)	19,9 (11-30)	17,4 (10-27,2)
SO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	5,2 (2,6-10,5)	7,9 (5,2-13,1)	7,9 (5,2-13,1)	5,2 (2,7-10,5)	5,2 (2,6-7,8)	5,2 (2,6-7,9)	2 (1-4)	5,2 (2,6-10,5)
O <sub>3</sub> (ppb)	6,3 (2-22)	11 (3-25,9)	7 (2-22)	4,7 (2-18)	8 (2-26)	5 (2-24)	8 (2-24)	9 (3-24)
CO (ppm)	0,5 (0,3-1,1)	0,3 (0,1-0,8)	0,4 (0,2-1,6)	0,4 (0,2-1)	0,5 (0,3-0,8)	0,6 (0,3-1,2)	0,3 (0,1-0,9)	0,4 (0,2-0,8)
Superaciones de norma horaria (n°)								
NO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	6
SO <sub>2</sub>	3	0	0	0	0	0	0	0

Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU). Estándar horario chileno (NO<sub>2</sub>: 213 ppb, SO<sub>2</sub>: 350  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , CO: 26 ppm)

## Variaciones semanales de las concentraciones diarias de contaminantes según temporada

Se obtuvieron las concentraciones diarias calculando el promedio de las concentraciones horarias observadas en un día para cada contaminante. La Figura 7 muestra la distribución de las concentraciones diarias de los contaminantes MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> durante los días de la semana. Tanto el MP<sub>10</sub> como el MP<sub>2,5</sub> muestran mayores concentraciones durante la temporada fría, en la cual no se observa predominio de algún día de la semana. El MP<sub>2,5</sub> mostró un predominio de altas concentraciones los miércoles durante la temporada cálida. Las normativas diarias chilenas de MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> fueron sobrepasadas todos los días de la semana en la temporada fría y con menor frecuencia en la temporada cálida. Cabe destacar que el valor recomendado por la OMS para ambos contaminantes, generalmente (75% de las observaciones), fue sobrepasado durante la temporada fría.

**Figura 7. Variaciones semanales de la distribución de las concentraciones diarias observadas de MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> según temporada.**

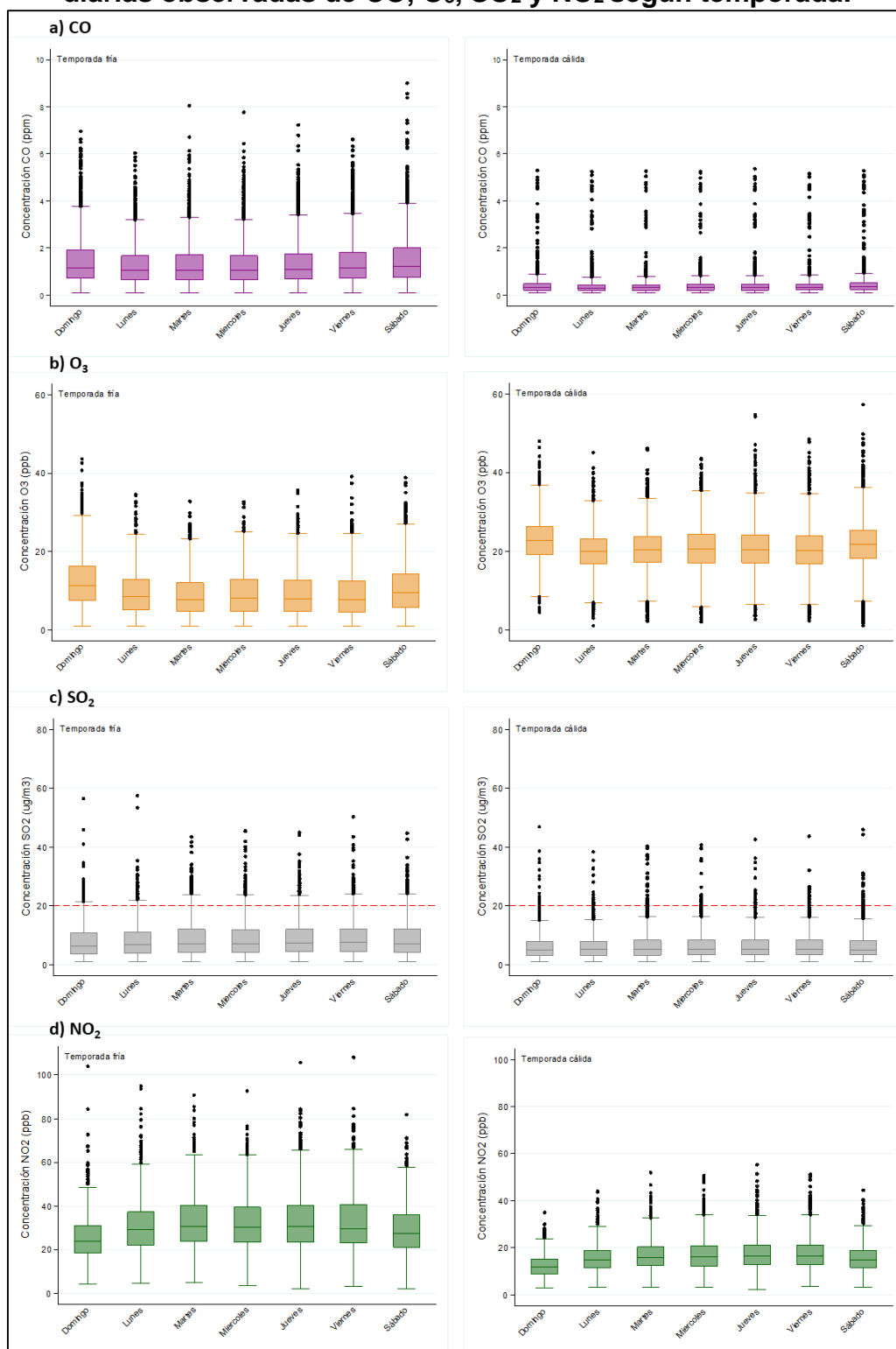


Temporada fría (izquierda): abril-septiembre, Temporada cálida (derecha): octubre-marzo. Línea continua: estándar diario chileno (MP<sub>10</sub>: 150 µg/m<sup>3</sup>, MP<sub>2,5</sub>: 50 µg/m<sup>3</sup>); línea punteada: valor guía OMS (MP<sub>10</sub>: 50 µg/m<sup>3</sup>, MP<sub>2,5</sub>: 25 µg/m<sup>3</sup>)

La Figura 8 muestra la distribución de las concentraciones diarias de los contaminantes CO, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> a través de los días de la semana. El CO en la temporada fría mostró concentraciones superiores que la temporada cálida, con predominio de las concentraciones altas los días sábado, martes y miércoles durante la temporada fría. El O<sub>3</sub> mostró concentraciones diarias superiores en la temporada cálida, y en ambas temporadas las concentraciones fueron más altas entre los jueves y domingo. El SO<sub>2</sub> mostró concentraciones diarias levemente superiores en la temporada fría, sin mostrar predominio por algún día de la semana; la normativa diaria chilena de 150 µg/m<sup>3</sup> para este contaminante no fue superada, no obstante, el valor recomendado por la OMS (20 µg/m<sup>3</sup>) es superado todos los días de la semana en ambas temporadas. El NO<sub>2</sub> muestra mayores concentraciones diarias durante la temporada fría, con predominio los jueves y viernes.



**Figura 8. Variaciones semanales de la distribución de las concentraciones diarias observadas de CO, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> según temporada.**

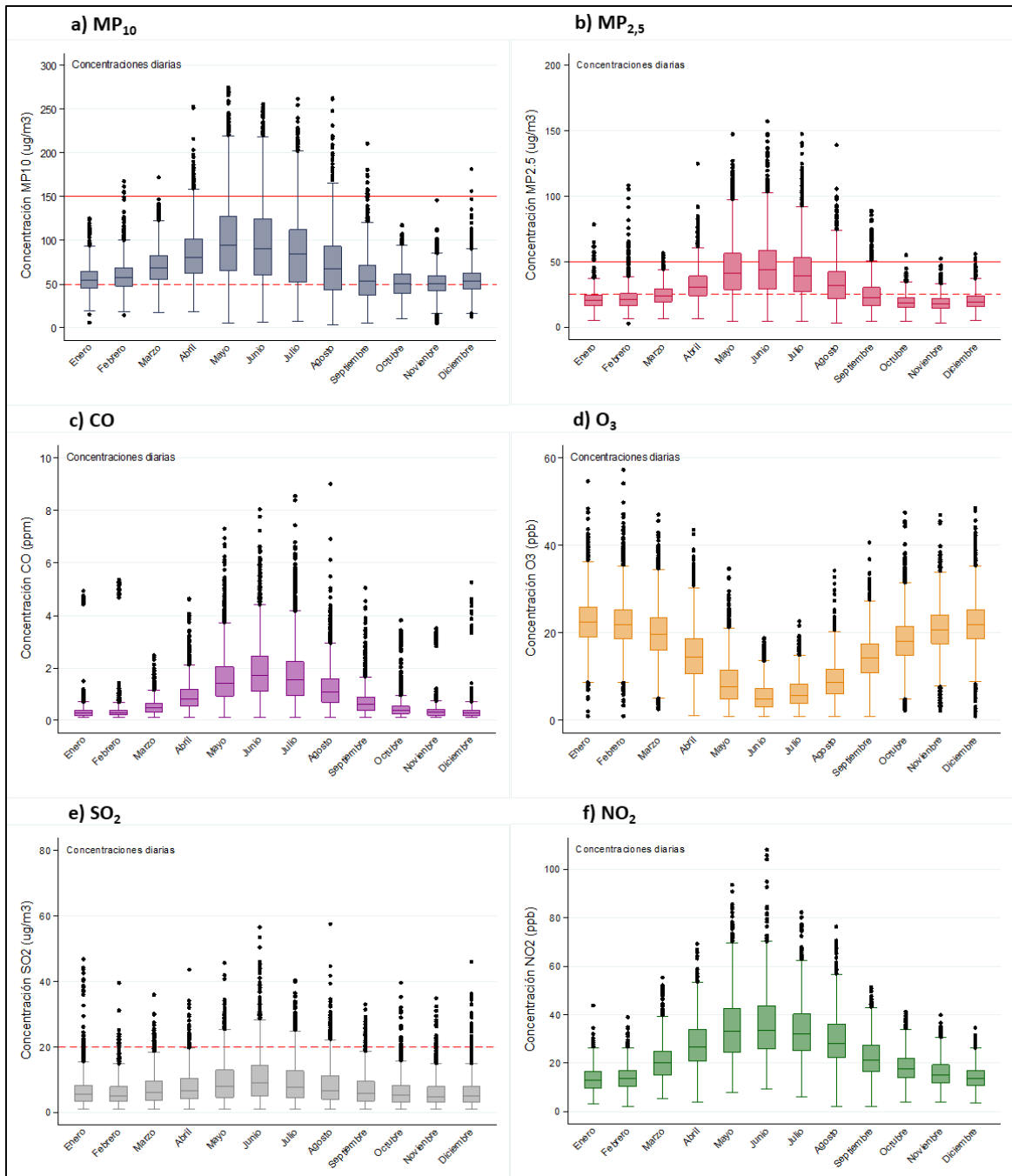


Temporada fría (izquierda): abril-septiembre, Temporada cálida (derecha): octubre-marzo. Línea continua: estándar diario chileno (SO<sub>2</sub>: 150 µg/m<sup>3</sup>); línea punteada: valor guía OMS (SO<sub>2,5</sub>: 20 µg/m<sup>3</sup>)

### ***Variaciones mensuales de las concentraciones diarias de contaminantes***

La Figura 9 muestra la distribución de las concentraciones diarias de todos los contaminantes según los meses del año. Las concentraciones diarias de  $MP_{10}$ ,  $MP_{2,5}$ , CO y  $NO_2$  tienen una distribución estacional marcada, con valores más altos en los meses de otoño-invierno y menores en los meses de primavera-verano. Esta distribución ha sido explicada en relación a una mayor ventilación y mejores condiciones de dispersión durante los meses más cálidos (Jhun et al. 2013). El  $SO_2$  muestra la misma distribución anterior pero menos marcada. Por otro lado, el  $O_3$  muestra una distribución inversa a la anterior con valores más altos durante los meses de primavera-verano y menores en los meses de otoño-invierno. La normativa diaria chilena tanto para  $MP_{10}$  como  $MP_{2,5}$  es sobrepasada principalmente en los meses de otoño-invierno, no obstante, la normativa de  $MP_{2,5}$  muestra superaciones en enero y febrero, lo cual podría corresponder a las emisiones provenientes de incendios forestales que usualmente ocurren en esos meses (Jhun et al. 2013).

**Figura 9. Variaciones mensuales de la distribución de las concentraciones diarias observadas.**

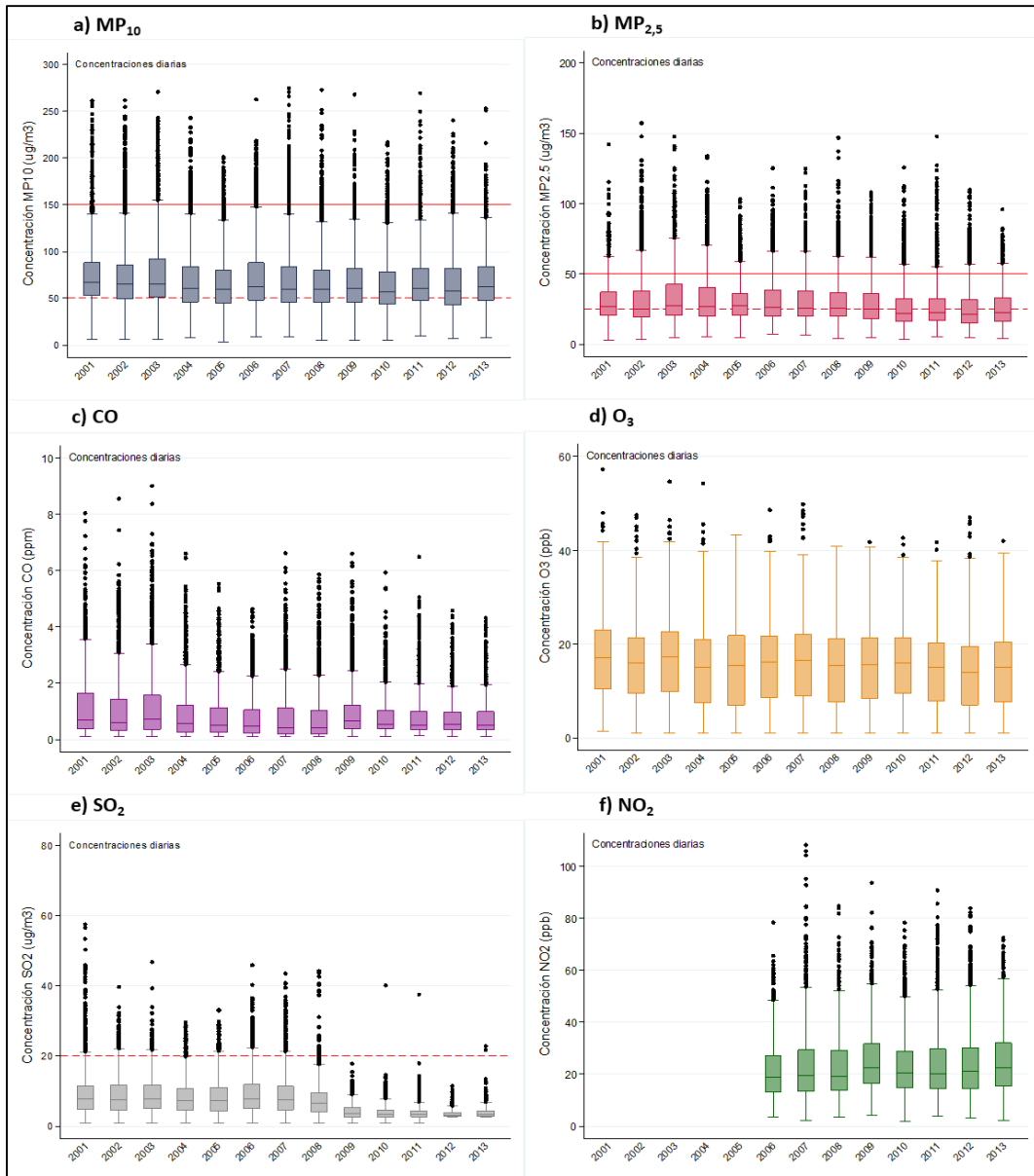


Línea continua: estándar diario chileno (MP<sub>10</sub>: 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , MP<sub>2,5</sub>: 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , SO<sub>2</sub>: 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ );  
 línea punteada: valor guía OMS (MP<sub>10</sub>: 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , MP<sub>2,5</sub>: 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , SO<sub>2</sub>: 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

### ***Variaciones anuales de las concentraciones diarias de contaminantes***

La Figura 10 muestra la distribución de las concentraciones diarias de todos los contaminantes durante el período de estudio (2001-2013). Las concentraciones diarias de  $MP_{10}$ ,  $MP_{2,5}$  y  $O_3$ , en general, no muestran una tendencia o evolución hacia la reducción o aumento de concentraciones en el período estudiado, sin embargo, el año 2005 se destaca por tener valores máximos algo inferiores al resto de los años. Las concentraciones diarias de CO a través de los años muestran una disminución progresiva entre 2004-2006, seguido de un aumento moderado entre 2007-2010, y posterior a esto una nueva disminución. Las concentraciones diarias de  $SO_2$ , no permitieron hacer una descripción adecuada debido a la gran cantidad de datos faltantes durante 2009-2013, período en el cual muestra una marcada reducción de las concentraciones diarias, no obstante, hubo 4 estaciones de monitoreo que dejaron de medir este contaminante tal como se mostró en la Tabla 7 (CE, CN, LC, PU). Finalmente, las concentraciones diarias de  $NO_2$ , disponibles progresivamente desde 2006, no mostraron ninguna tendencia, aunque se destaca el año 2007 con concentraciones diarias muy superiores al resto de los años con mediciones disponibles.

**Figura 10. Variaciones anuales de la distribución de las concentraciones diarias observadas.**



Línea continua: estándar diario chileno ( $MP_{10}$ :  $150 \mu g/m^3$ ,  $MP_{2.5}$ :  $50 \mu g/m^3$ ,  $SO_2$ :  $150 \mu g/m^3$ );  
 línea punteada: valor guía OMS ( $MP_{10}$ :  $50 \mu g/m^3$ ,  $MP_{2.5}$ :  $25 \mu g/m^3$ ,  $SO_2$ :  $20 \mu g/m^3$ )

### **Concentraciones diarias de contaminantes según estación de monitoreo**

Las medidas de resumen de las concentraciones diarias observadas para todo el período de estudio según estación de monitoreo se presentan en la Tabla 10, en la cual se puede observar que existe bastante variabilidad en las medianas de las concentraciones de los contaminantes entre las 8 estaciones de monitoreo, excepto para el contaminante CO. La estación LF registró las mayores medianas tanto para

MP<sub>10</sub> como MP<sub>2,5</sub> y la estación LC mostró las medianas más bajas. En el caso del NO<sub>2</sub> los mayores valores se registraron en las estaciones BO e IN y las menores medianas se registraron en CE y PU. Las estaciones CE y CN mostraron las mayores medianas de concentraciones horarias de SO<sub>2</sub> para todo el período y el menor valor se observó en PO. Las mayores medianas de concentraciones horarias de O<sub>3</sub> se observan en las estaciones CE y LC. Las medianas de las concentraciones de CO fueron similares en todas las estaciones de monitoreo para todo el período de estudio y no se registraron superaciones de la normativa.

En relación a las superaciones de la normativa chilena de MP, se observaron estaciones de monitoreo que tienen desde el doble hasta el cuádruple de días que se superó la normativa tanto para MP<sub>10</sub> (CN y PU) como para MP<sub>2,5</sub> (LF, PO, PU), no obstante, este reporte es un número absoluto y depende de la cantidad de datos disponibles por estación de monitoreo; por lo tanto, en el caso del MP<sub>2,5</sub> se debe considerar que las estaciones BO, CE, CN e IN disponen de mediciones solo entre 2009-2013 (5 años).

**Tabla 10. Mediana y rango intercuartil de las concentraciones diarias observadas de todos los contaminantes según estación de monitoreo.**

Concentraciones diarias observadas								
	BO	CE	CN	IN	LC	LF	PO	PU
	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )
<b>MP<sub>10</sub></b>	69,1	63,7	61,7	60,7	50,3	68,5	62,4	58,5
<b>(µg/m<sup>3</sup>)</b>	(53-92,5)	(47,8-86,2)	(45,8-92)	(47,4-80,3)	(39-62,3)	(53,6-91,5)	(47,7-87,1)	(43,9-84,8)
<b>MP<sub>2,5</sub></b>	24,1	23,4	21,3	22,4	22	27,8	26,2	23,5
<b>(µg/m<sup>3</sup>)</b>	(17,8-37,2)	(16,8-36,1)	(15,4-36,4)	(16,8-32,1)	(17-28,3)	(21-38,5)	(19,1-39,8)	(16,8-37,9)
<b>NO<sub>2</sub></b>	22,6	18,3	18,5	29,5	22,3	20,6	20	17,4
<b>(ppb)</b>	(16,6-31,3)	(12,4-28,3)	(12,3-26,7)	(21,7-40,8)	(16,7-32,2)	(16,1-27,6)	(13,9-29,5)	(12,3-26,1)
<b>SO<sub>2</sub></b>	6,3	9,8	9,4	7	5,5	5,2	2,5	7
<b>(µg/m<sup>3</sup>)</b>	(3,6-11)	(6,4-14,3)	(6,3-13)	(4,3-10,7)	(4-7,3)	(3,3-8,4)	(1,7-4)	(4,7-10,5)
<b>O<sub>3</sub></b>	14,6	17,7	14,9	13,1	18,6	15,8	16,6	16,3
<b>(ppb)</b>	(8-19,4)	(10,3-23)	(7,7-19,6)	(6,2-18,3)	(8,8-26,5)	(8,7-21,8)	(8-22,5)	(9,3-21)
<b>CO</b>	0,7	0,4	0,6	0,5	0,5	0,7	0,4	0,5
<b>(ppm)</b>	(0,4-1,3)	(0,2-1)	(0,2-1,8)	(0,3-1,1)	(0,4-0,8)	(0,4-1,3)	(0,2-1,1)	(0,3-1,1)
Superaciones de norma diaria (n°)								
<b>MP<sub>10</sub></b>	179	107	469	60	1	102	155	236
<b>MP<sub>2,5</sub></b>	215	183	282	73	110	534	743	889

Nombres estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU). Estándar diario chileno MP<sub>10</sub>: 150 µg/m<sup>3</sup>, Estándar diario chileno MP<sub>2,5</sub>: 50 µg/m<sup>3</sup>. Sin superaciones estándar diario SO<sub>2</sub> (150 ppm).

### **Imputación de las concentraciones horarias de contaminantes según estación de monitoreo**

Como fue descrito en el capítulo de Métodos, se realizó la imputación de los datos horarios faltantes en cada estación de monitoreo por separado, cuando éstos fueron inferiores al 10% y para los contaminantes que disponían de mediciones durante todo el período de estudio: MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub>, CO y O<sub>3</sub>.

Posterior a la imputación de los datos faltantes, se preparó la base de datos diaria conteniendo el promedio y el máximo de 24 horas de las medias móviles de las concentraciones horarias de contaminantes en cada estación de monitoreo. La Tabla 11 muestra los valores de la correlación de Pearson entre las concentraciones medias y máximas diarias observadas e imputadas para todas las estaciones de monitoreo, en la cual se observa que hubo una alta correlación (entre 0,62 y 0,83) significativa al 5% para todos los contaminantes, observándose correlaciones más altas para los promedios diarios. Las correlaciones para cada estación de monitoreo pueden ser revisadas en la sección Anexos (Tabla A 3).

**Tabla 11. Correlación de Pearson entre las medias diarias observadas e imputadas para los contaminantes MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub>, CO y O<sub>3</sub>.**

<b>Concentraciones observadas</b>	<b>Concentraciones imputadas</b>
<b>Promedio diario</b>	
MP <sub>10</sub>	0,69
MP <sub>2,5</sub>	0,76
O <sub>3</sub>	0,83
CO	0,82
<b>Máximo diario</b>	
MP <sub>10</sub>	0,62
MP <sub>2,5</sub>	0,71
O <sub>3</sub>	0,72
CO	0,79

Todas las correlaciones tienen valores  $p < 0,05$

La Tabla 12 muestra las medidas de resumen de las concentraciones diarias imputadas para todo el período de estudio según estación de monitoreo, en la cual se puede observar que los valores son bastante similares a los reportados en la Tabla 10 donde se describen los valores observados.

**Tabla 12. Mediana y rango intercuartil de las concentraciones diarias imputadas de todos los contaminantes según estación de monitoreo.**

<b>Concentraciones diarias imputadas</b>								
	<b>BO</b>	<b>CE</b>	<b>CN</b>	<b>IN</b>	<b>LC</b>	<b>LF</b>	<b>PO</b>	<b>PU</b>
	<b>P<sub>50</sub></b>	<b>P<sub>50</sub></b>	<b>P<sub>50</sub></b>	<b>P<sub>50</sub></b>	<b>P<sub>50</sub></b>	<b>P<sub>50</sub></b>	<b>P<sub>50</sub></b>	<b>P<sub>50</sub></b>
	<b>(P<sub>25</sub>-P<sub>75</sub>)</b>	<b>(P<sub>25</sub>-P<sub>75</sub>)</b>	<b>(P<sub>25</sub>-P<sub>75</sub>)</b>	<b>(P<sub>25</sub>-P<sub>75</sub>)</b>	<b>(P<sub>25</sub>-P<sub>75</sub>)</b>	<b>(P<sub>25</sub>-P<sub>75</sub>)</b>	<b>(P<sub>25</sub>-P<sub>75</sub>)</b>	<b>(P<sub>25</sub>-P<sub>75</sub>)</b>
<b>MP<sub>10</sub></b>	69,1	63,8	62,9	60,7	50,3	68,5	62,4	58,5
<b>(µg/m<sup>3</sup>)</b>	(53-92,5)	(47,8-86,3)	(46,2-97,2)	(47,4-80,4)	(39-62,3)	(53,6-91,5)	(47,7-87,1)	(43,9-84,8)
<b>MP<sub>2,5</sub></b>	24,1	23,3	21,4	22,5	22	27,8	26,7	24,3
<b>(µg/m<sup>3</sup>)</b>	(17,8-37,2)	(16,8-35,9)	(15,4-36,5)	(16,8-32,4)	(17-28,3)	(21-38,5)	(19,3-39,2)	(17,1-40,9)
<b>O<sub>3</sub></b>	14,6	17,6	14,9	13,1	18,6	15,8	16,6	16,3
<b>(ppb)</b>	(8-19,4)	(10,3-22,8)	(7,7-19,5)	(6,3-18,3)	(8,8-26,5)	(8,7-21,7)	(7,9-22,5)	(9,3-21)
<b>CO</b>	0,7	0,4	0,6	0,5	0,5	0,7	0,4	0,5
<b>(ppm)</b>	(0,4-1,3)	(0,2-1,1)	(0,3-1,8)	(0,3-1,1)	(0,4-0,8)	(0,4-1,3)	(0,2-1,1)	(0,3-1,1)

Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU)



Finalmente, en base al AED realizado se puede resumir lo siguiente:

1. Los contaminantes  $MP_{10}$ , CO y  $O_3$  tienen datos horarios disponibles para todo el período estudiado en todas las estaciones de monitoreo incluidas, con una baja frecuencia de datos faltantes. En el caso del  $MP_{2,5}$  solo 4 estaciones de monitoreo tuvieron datos disponibles para todo el período.
2. Hubo marcadas diferencias para las concentraciones horarias y diarias de los contaminantes entre las temporadas, con mayores concentraciones en la temporada fría, excepto para el  $O_3$  que mostró mayores concentraciones en la temporada cálida.
3. Las medidas de resumen de las concentraciones observadas, tanto horarias como diarias, fueron heterogéneas entre las estaciones de monitoreo, lo cual aparentemente representa una distribución desigual de las concentraciones de contaminantes entre los distintos territorios.
4. Las superaciones de la normativa diaria de  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$  fueron bastante frecuentes, especialmente en la temporada fría.
5. Mediante la imputación de los datos horarios faltantes se pudo obtener una base de datos de concentraciones diarias para todo el período estudiado para los contaminantes  $MP_{10}$ ,  $MP_{2,5}$ ,  $O_3$  y CO mostrando una buena correlación con las concentraciones observadas. Estos contaminantes fueron utilizados para responder al objetivo general de este estudio.

A continuación, se dará respuesta a los objetivos específicos planteados.

## **9.2. OE 1. Describir las concentraciones de contaminantes y variables meteorológicas en Santiago durante el período previo y posterior a la introducción de la reforma al transporte público (TS)**

La base de datos diaria consideró la media y el máximo de 24 horas de las concentraciones horarias de contaminantes. Se construyeron estadísticas descriptivas y gráficas de series de tiempo para todos los contaminantes y sus mediciones disponibles, inspeccionando el período previo (2001-2006) y posterior (2008-2013) a la implementación de TS.

La Tabla 13 muestra las medidas de resumen de las concentraciones medias diarias de los contaminantes y las variables meteorológicas considerando todas las estaciones de monitoreo, comparando el período previo con el posterior a la implementación de TS. Se puede observar que, en general, todos los contaminantes tuvieron concentraciones más bajas y menores superaciones a la normativa en el período post TS.

Las temperaturas medias y mínimas diarias fueron levemente inferiores en el período 2008-2013 ( $\approx 16^{\circ}\text{C}$  y  $\approx 10^{\circ}\text{C}$ , respectivamente). En general, la humedad relativa fue moderada (58-60%) y la velocidad del viento fue baja ( $\approx 1,3$  m/s). Hubo pocas precipitaciones ( $\approx 1,8$  mm) y el promedio del número de días anuales en que se registraron precipitaciones bajó de 41 días/año en el período 2001-2006 a 32 días/año en el período 2008-2013. La descripción de las variables meteorológicas según estación de monitoreo se puede revisar en la sección Anexos (Tabla A 4 y Tabla A 5).

**Tabla 13. Estadísticas descriptivas de las concentraciones medias diarias de contaminantes, variables meteorológicas y superaciones de normativa diaria y comparación entre el período previo y posterior a la introducción de TS en todas las estaciones de monitoreo.**

	Período 2001-2006			Período 2008-2013			p-valor*
	n	Media (DE)	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	n	Media (DE)	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	
<b>Contaminantes</b>							
MP <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	17443	72,1 (35,7)	63,7 (48,4-87,5)	17536	66,8 (31,6)	59,8 (45,6-81,3)	<0,001
MP <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	8764	33 (19)	27,2 (20,3-39,9)	16072	27 (15,4)	22,8 (16,6-33,3)	<0,001
CO (ppm)	17446	0,98 (1)	0,6 (0,3-1,3)	17536	0,79 (0,7)	0,5 (0,3-1)	<0,001
O <sub>3</sub> (ppb)	17438	15,7 (8,3)	16,1 (8,6-21,9)	17536	14,8 (7,8)	15,1 (8-20,6)	<0,001
SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	16343	8,8 (5,6)	7,5 (4,7-11,4)	9251	4,9 (3,5)	3,8 (2,8-5,9)	<0,001
NO <sub>2</sub> (ppb)	1089	21,5 (11,7)	18,6 (12,9-27,1)	14950	23,8 (12,2)	21,1 (14,8-30,3)	<0,001
<b>Meteorología</b>							
T° media (°C)	17443	16,8 (5,1)	16,9 (12,6-21)	16479	15,9 (5,6)	15,9 (11,5-20,6)	<0,001
T° mínima (°C)	17446	11 (4,4)	11 (8,3-14,1)	16479	9,6 (5,1)	9,8 (6,4-13,5)	<0,001
H, Relativa (%)	16343	60,8 (18,1)	61,4 (48,5-74,8)	17157	58,3 (15,8)	58,7 (48,1-69,8)	<0,001
Vel, Viento (m/s)	17536	1,4 (0,7)	1,3 (0,9-1,7)	16693	1,4 (0,6)	1,3 (1-1,7)	0,318
Precipitaciones (mm)	2191	1,8 (7,4)	0 (0-111)	2192	1,7 (4,7)	0 (0-78)	0,235
		n (%)			n (%)		p-valor**
<b>Superación norma diaria</b>							
Superaciones MP <sub>10</sub>		777 (4,4%)			383 (2,9%)		<0,001
Superaciones MP <sub>2,5</sub>		1417 (16,2%)			1394 (8,7%)		<0,001

\*test Mann-Whitney; \*\*test Ji-Cuadrado; en negritas valores significativos

### **Concentraciones medias diarias de contaminantes durante el período previo y posterior a la introducción de TS según estación de monitoreo**

La Tabla 14 muestra las medidas de resumen de las concentraciones medias diarias de MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub>, en el período previo y posterior a TS para cada estación de monitoreo. La mediana de las concentraciones diarias de MP<sub>10</sub> más bajas se registraron en la estación LC tanto en el período previo como posterior a TS (51,7 µg/m<sup>3</sup> y 50,1 µg/m<sup>3</sup>, respectivamente), y las medianas más altas se registraron en las estaciones BO y LF en ambos períodos (>65 µg/m<sup>3</sup>). En relación con la comparación de los valores entre los 2 períodos, casi todas las estaciones mostraron disminuciones en sus valores, sin embargo, para LC y PO no hubo diferencias significativas.

Las medianas de las concentraciones diarias de MP<sub>2,5</sub>, estaban disponibles solo en 4 estaciones que tenían mediciones para el período previo a TS (LC, LF, PO, PU), donde el menor valor se observó en LC (24 µg/m<sup>3</sup>) y el mayor en LF (30,3 µg/m<sup>3</sup>). Para el período posterior, las 8 estaciones disponían de mediciones, donde el menor valor nuevamente se registra en LC (20 µg/m<sup>3</sup>) y los valores más altos se observaron en LF, PO, BO (>24 µg/m<sup>3</sup>). Las 4 estaciones mostraron disminuciones significativas en sus valores al comparar ambos períodos.

**Tabla 14. Estadísticas descriptivas de las concentraciones medias diarias de contaminantes MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> y comparación entre el período previo y posterior a la introducción de TS según estación de monitoreo.**

	Período 2001-2006		Período 2008-2013		p-valor
	Media (DE)	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	Media (DE)	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	
<b>MP<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>					
BO	77,9 (35,7)	70,4 (54,4-95,8)	73,4 ± (31,1)	68,3 (51,8-88,9)	<b>&lt;0,001</b>
CE	73,1 (34,4)	67,0 (49,2-91,0)	66,7 ± (28,6)	61,7 (47,1-82,4)	<b>&lt;0,001</b>
CN	83,9 (46,2)	70,1 (50-112,2)	70,1 ± (39,7)	57,3 (43,9-86,4)	<b>&lt;0,001</b>
IN	69,3 (30,0)	63,2 (49,2-83,0)	63,1 ± (25,9)	57,9 (45,4-77,3)	<b>&lt;0,001</b>
LC	52,7 (18,7)	51,7 (40,6-62,8)	51,8 ± (18,9)	50,1 (38,9-63,4)	0,0585
LF	76,6 (31,8)	71,2 (54,9-93,7)	72,7 ± (30,2)	66,1 (52,2-88,9)	<b>&lt;0,001</b>
PO	70,7 (35,2)	61,8 (47,0-86,3)	70,7 ± (32,3)	63,3 (48,3-88,0)	0,216
PU	72,9 (39,6)	62,8 (46,4-89,8)	65,9 ± (35,9)	54,8 (42,3-80,3)	<b>&lt;0,001</b>
<b>MP<sub>2,5</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>					
BO	-	-	28,9 (15,8)	24,1 (17,8-37,2)	-
CE	-	-	27,8 (15,1)	23,3 (16,8-35,9)	-
CN	-	-	29,2 (20,8)	21,4 (15,4-36,5)	-
IN	-	-	25,3 (11,8)	22,5 (16,8-32,4)	-
LC	25,9 (11,0)	24,0 (18,7-30,9)	21,2 (8,2)	20,0 (15,8-25,3)	<b>&lt;0,001</b>
LF	34,3 (16,3)	30,3 (23,0-42,5)	28,1 (12,6)	25,3 (19,1-34,7)	<b>&lt;0,001</b>
PO	35,4 (20,9)	29,1 (21,3-43,9)	28,2 (14,6)	24,2 (17,6-35,8)	<b>&lt;0,001</b>
PU	36,3 (23,5)	26,9 (19,0-49,6)	28,2 (19,4)	21,9 (15,2-34,4)	<b>&lt;0,001</b>

Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU); \*test Mann-Whitney; en negritas valores significativos

Las estadísticas de resumen de las concentraciones máximas diarias de MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> según estación de monitoreo pueden ser revisadas en los anexos (Tabla A 6), las cuales mostraron una distribución similar a la anteriormente descrita para las concentraciones medias diarias.

La Tabla 15 muestra las medidas de resumen de las concentraciones medias diarias de CO y O<sub>3</sub>, en el período previo y posterior a TS según estación de monitoreo. En el período previo a TS, las medianas más bajas de las concentraciones diarias de CO se registraron en las estaciones CE y PO (0,4 ppm) y las más altas en las estaciones CN y LF (0,9 ppm y 0,8 ppm, respectivamente). En el período posterior a TS, las medianas de las concentraciones diarias fueron similares en todas las estaciones de monitoreo (0,5-0,6 ppm). Al comparar las medianas de concentraciones entre los 2 períodos, dos estaciones mostraron un aumento en sus valores (CE y PO) y 4 estaciones mostraron una disminución (BO, CN, LC, LF).

En relación con las medianas de las concentraciones de O<sub>3</sub> en ambos períodos, los mayores valores se observaron en LC y CE (período previo TS: 19,4 y 18 ppb, respectivamente; período posterior TS: 17,6 y 16,9 ppb, respectivamente) y el menor valor se observó en la estación IN (período previo TS: 13,4 ppb; período posterior TS: 12,7 ppb). Las 8 estaciones mostraron disminuciones en sus medianas de concentraciones al comparar ambos períodos (solo en estación CN la disminución no fue significativa).

**Tabla 15. Estadísticas descriptivas de las concentraciones medias diarias de contaminantes CO y O<sub>3</sub> y comparación entre el período previo y posterior a la introducción de TS según estación de monitoreo.**

		Período 2001-2006		Período 2008-2013		p-valor*	
	n	Media (DE)	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	n	Media (DE)		P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )
<b>CO (ppm)</b>							
BO	2191	1,0 (0,9)	0,7 (0,4-1,5)	2192	0,9 (0,7)	0,6 (0,4-1,2)	<b>&lt;0,001</b>
CE	2191	0,8 (0,9)	0,4 (0,2-1,1)	2192	0,7 (0,6)	0,5 (0,3-1,0)	<b>&lt;0,001</b>
CN	2109	1,6 (1,6)	0,9 (0,3-2,6)	2192	0,9 (1,0)	0,5 (0,3-1,3)	<b>&lt;0,001</b>
IN	2191	0,9 (0,8)	0,6 (0,3-1,3)	2192	0,7 (0,5)	0,5 (0,4-1,1)	0,521
LC	2191	0,7 (0,4)	0,6 (0,4-0,9)	2192	0,6 (0,3)	0,5 (0,3-0,7)	<b>&lt;0,001</b>
LF	2191	1,1 (0,8)	0,8 (0,5-1,5)	2192	0,8 (0,6)	0,6 (0,4-1,2)	<b>&lt;0,001</b>
PO	2191	1,0 (1,1)	0,4 (0,2-1,4)	2192	0,7 (0,7)	0,5 (0,3-1,0)	<b>&lt;0,001</b>
PU	2191	0,9 (1,0)	0,5 (0,2-1,2)	2192	0,9 (0,9)	0,5 (0,3-1,1)	<b>0,005</b>
<b>O<sub>3</sub> (ppb)</b>							
BO	2191	14,5 (7,0)	15,0 (8,4-19,9)	2192	13,4 (6,7)	14,1 (7,6-18,4)	<b>&lt;0,001</b>
CE	2191	17,0 (7,9)	18,0 (10,3-23,2)	2192	16,5 (7,6)	16,9 (10,3-22,3)	<b>0,021</b>
CN	2101	13,9 (6,9)	14,7 (7,8-19,2)	2192	14,1 (7,2)	14,9 (7,4-19,7)	0,255
IN	2191	13,0 (7,2)	13,4 (6,3-18,6)	2192	12,4 (7,0)	12,7 (5,9-17,9)	<b>0,005</b>
LC	2191	19,0 (10,9)	19,4 (9,1-27,8)	2192	17,6 (9,7)	17,9 (8,6-25,2)	<b>0,001</b>
LF	2191	16,0 (8,1)	16,9 (9,0-22,6)	2192	14,8 (7,5)	14,9 (8,4-20,3)	<b>&lt;0,001</b>
PO	2191	16,5 (9,0)	17,3 (8,4-23,7)	2192	14,8 (7,9)	15,8 (7,4-21,3)	<b>&lt;0,001</b>
PU	2191	16,0 (7,3)	16,9 (9,8-21,6)	2192	14,8 (7,0)	15,4 (8,6-20,2)	<b>&lt;0,001</b>

Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU); \*test Mann-Whitney; en negritas valores significativos

Las estadísticas de resumen de las concentraciones máximas de O<sub>3</sub> y CO según estación de monitoreo pueden ser revisados en la sección Anexos (Tabla A 7), las cuales mostraron una distribución similar a la anteriormente descrita para las concentraciones medias diarias.

### **Superación de los estándares chilenos de calidad del aire para MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> en el período previo y posterior a la introducción de TS según estación de monitoreo**

La Tabla 16 muestra el número de superaciones del estándar chileno de 24 horas en el período previo y posterior a TS para los contaminantes MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> según estación de monitoreo. La mayor cantidad de superaciones de la normativa de MP<sub>10</sub> (150 µg/m<sup>3</sup>) en ambos períodos, se observó en CN (316 y 122, respectivamente), superando por una gran diferencia al resto de las estaciones. Por el contrario, la estación de LC registró una cantidad mínima de superaciones en el período previo

(1 superación) y ninguna superación en el período posterior. De todas formas, las 8 estaciones de monitoreo registraron disminuciones en el número de superaciones de la normativa, no obstante, solo 6 fueron significativas (BO, CE, CN, IN, PO, PU). En relación con la superación de la normativa de 24 horas de MP<sub>2,5</sub> (50 µg/m<sup>3</sup>) en el período previo a TS, 3 de las 4 estaciones registraron más de 300 superaciones (LF, PO, PU), contrario a LC que mostró un número muy inferior (85 superaciones). En el período posterior a TS, se registraron más de 200 superaciones en BO, CN, PO y PU, y nuevamente el menor registro se observó en LC (7 superaciones). Las 4 estaciones mostraron disminuciones significativas al comparar ambos períodos.

**Tabla 16. Comparación del número de superaciones (n) del estándar diario chileno de MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub>, entre el período previo y posterior a la introducción de TS según estación de monitoreo.**

	Período 2001-2006	Período 2008-2013	p-valor**
	n=2191 días	n=2192 días	
	n (%)	n (%)	
<b>Superación norma diaria MP<sub>10</sub> (150 µg/m<sup>3</sup>)</b>			
BO	98 (4,5)	54 (2,5)	<b>&lt;0,001</b>
CE	70 (3,2)	25 (1,1)	<b>&lt;0,001</b>
CN	316 (14,4)	122 (5,6)	<b>&lt;0,001</b>
IN	39 (1,8)	10 (0,5)	<b>&lt;0,001</b>
LC	1 (0,1)	0 (0,0)	0,317
LF	51 (2,3)	34 (1,6)	0,062
PO	80 (3,7)	55 (2,5)	<b>0,029</b>
PU	122 (5,6)	83 (3,8)	<b>0,005</b>
<b>Superación norma diaria MP<sub>2,5</sub> (50 µg/m<sup>3</sup>)</b>			
BO*	-	215 (11,7)	-
CE*	-	183 (10,0)	-
CN*	-	282 (15,4)	-
IN*	-	73 (4,0)	-
LC	85 (3,9)	7 (0,3)	<b>&lt;0,001</b>
LF	339 (15,5)	139 (6,3)	<b>&lt;0,001</b>
PO	450 (20,5)	224 (10,2)	<b>&lt;0,001</b>
PU	543 (24,8)	271 (12,4)	<b>&lt;0,001</b>

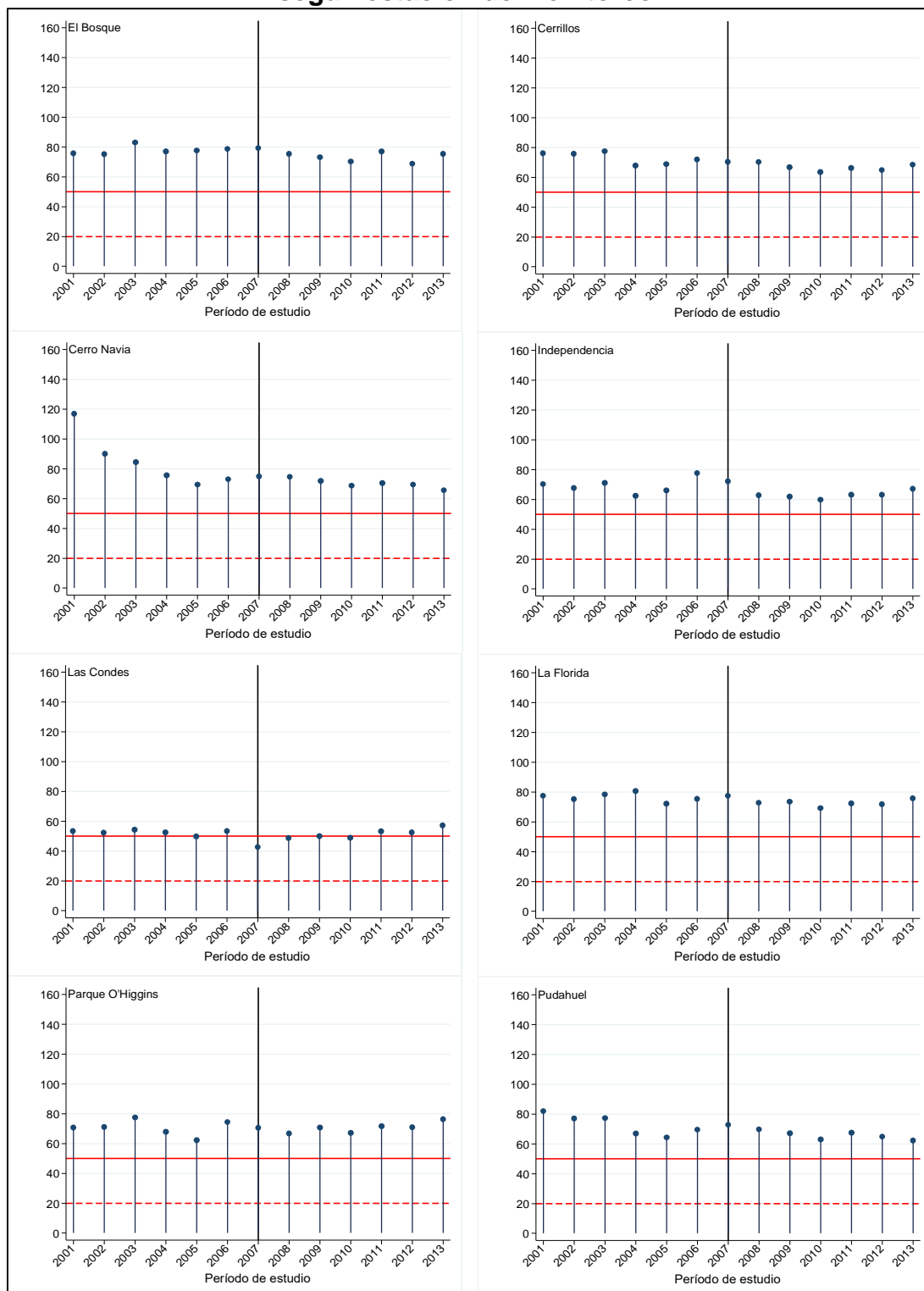
Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU). \*1826 observaciones \*\*test Ji-Cuadrado; en negritas valores significativos

La Figura 11 muestra las concentraciones anuales de MP<sub>10</sub> en cada año de estudio para cada estación de monitoreo, en la cual se puede observar que, durante todo el período de estudio, en la mayoría de las estaciones se superó ampliamente el

estándar chileno de concentración anual de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  cuyo objetivo es proteger la salud de la población de los efectos de la contaminación a largo plazo. No obstante, la estación LC mostró valores muy cercanos al estándar, incluso algunos años sin superarlo. Al observar las concentraciones anuales en el tiempo, no se logra identificar algún descenso posterior a la implementación del TS. Los valores de las concentraciones anuales de  $\text{MP}_{10}$  según estación de monitoreo se pueden revisar en los anexos (Tabla A 8).



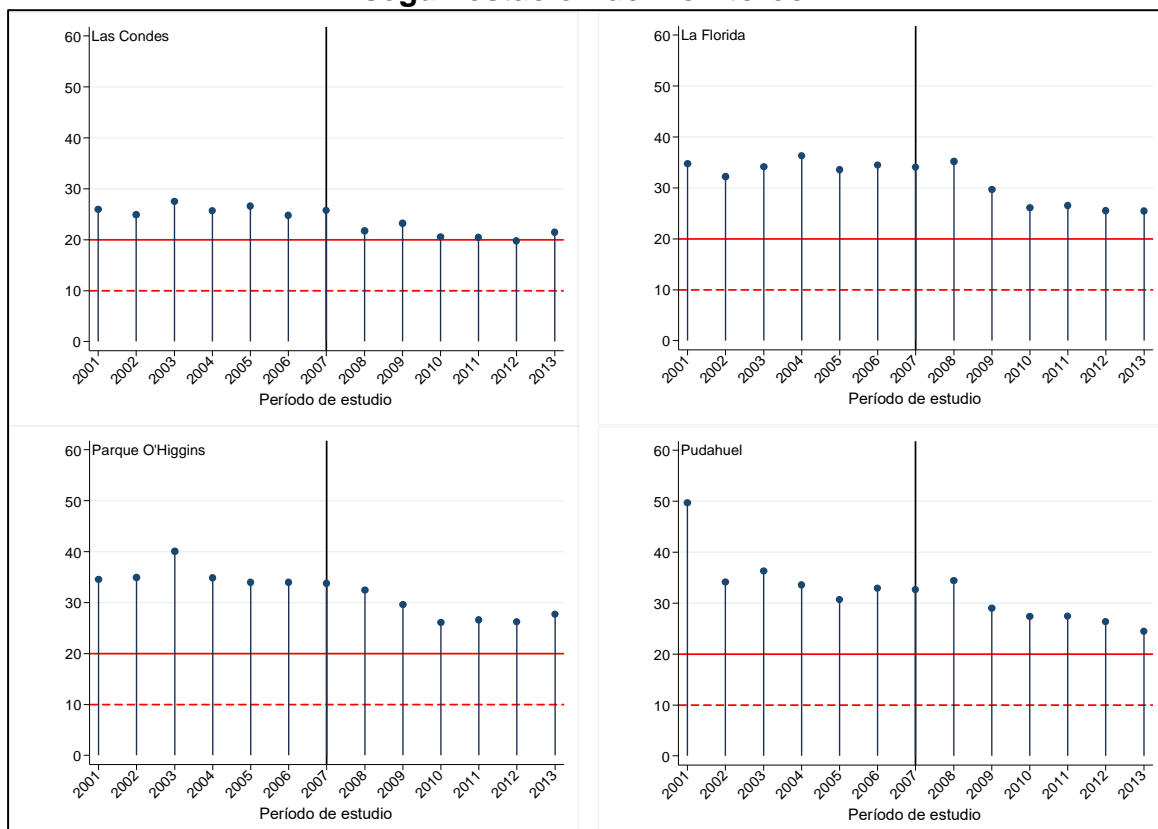
**Figura 11. Concentraciones anuales de MP<sub>10</sub> durante el período de estudio según estación de monitoreo.**



Línea roja continua: estándar anual chileno (MP<sub>10</sub>: 50 µg/m<sup>3</sup>); línea roja punteada: valor guía OMS (MP<sub>10</sub>: 20 µg/m<sup>3</sup>); línea vertical negra: año implementación TS

La Figura 12 muestra las concentraciones anuales de  $MP_{2,5}$  en cada año de estudio para las 4 estaciones de monitoreo con disponibilidad de datos para todo el período de estudio, en la cual se puede observar que en la mayoría de las estaciones se superó el estándar chileno de concentración anual de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  cuyo objetivo es proteger la salud de la población de los efectos de la contaminación por  $MP_{2,5}$  a largo plazo; no obstante, la estación LC mostró valores muy cercanos al estándar. Al observar las concentraciones anuales en el tiempo, se logra identificar un aparente descenso en las concentraciones anuales posterior a la implementación del TS. Los valores de las concentraciones anuales de  $MP_{2,5}$  según estación de monitoreo se pueden revisar en la sección Anexos (Tabla A 8).

**Figura 12. Concentraciones anuales de  $MP_{2,5}$  durante el período de estudio según estación de monitoreo.**



Línea roja continua: estándar anual chileno ( $MP_{2,5}$ :  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ); línea roja punteada: valor guía OMS ( $MP_{2,5}$ :  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ); línea vertical negra: año implementación TS

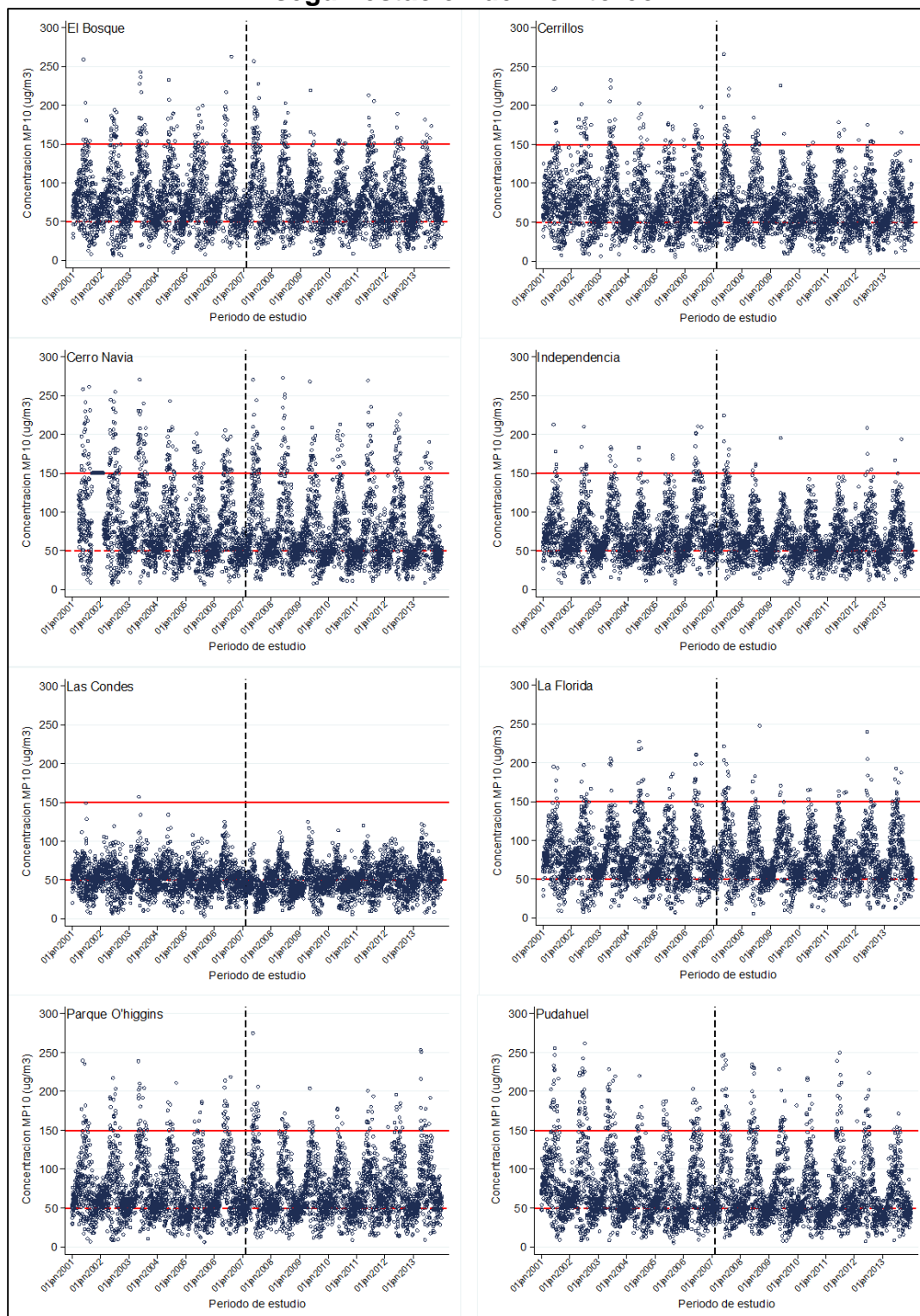
### ***Series de tiempo de las concentraciones medias diarias de contaminantes durante todo el período de estudio según estación de monitoreo***

Las Figuras 13 y 14 muestran los gráficos de serie de tiempo de las concentraciones medias diarias de  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$  para cada estación de monitoreo. Se puede observar que ambos contaminantes tienen un patrón estacional marcado, con valores más bajos en los meses cálidos y más altos en los meses fríos, donde se registran las superaciones de la normativa diaria. Se destaca la estación LC, que para ambos contaminantes registra valores muy inferiores al resto de las estaciones de monitoreo.

Ambas figuras, muestran de manera gráfica, la tendencia en las concentraciones diarias de los contaminantes, en algunos casos hacia la disminución y en otros hacia la mantención de los niveles. Al igual que las concentraciones anuales, en las concentraciones diarias no se logra identificar algún descenso posterior a la implementación del TS para el  $MP_{10}$ , y en el caso del  $MP_{2,5}$  se logra identificar un aparente descenso en las concentraciones diarias posterior a la implementación del TS.

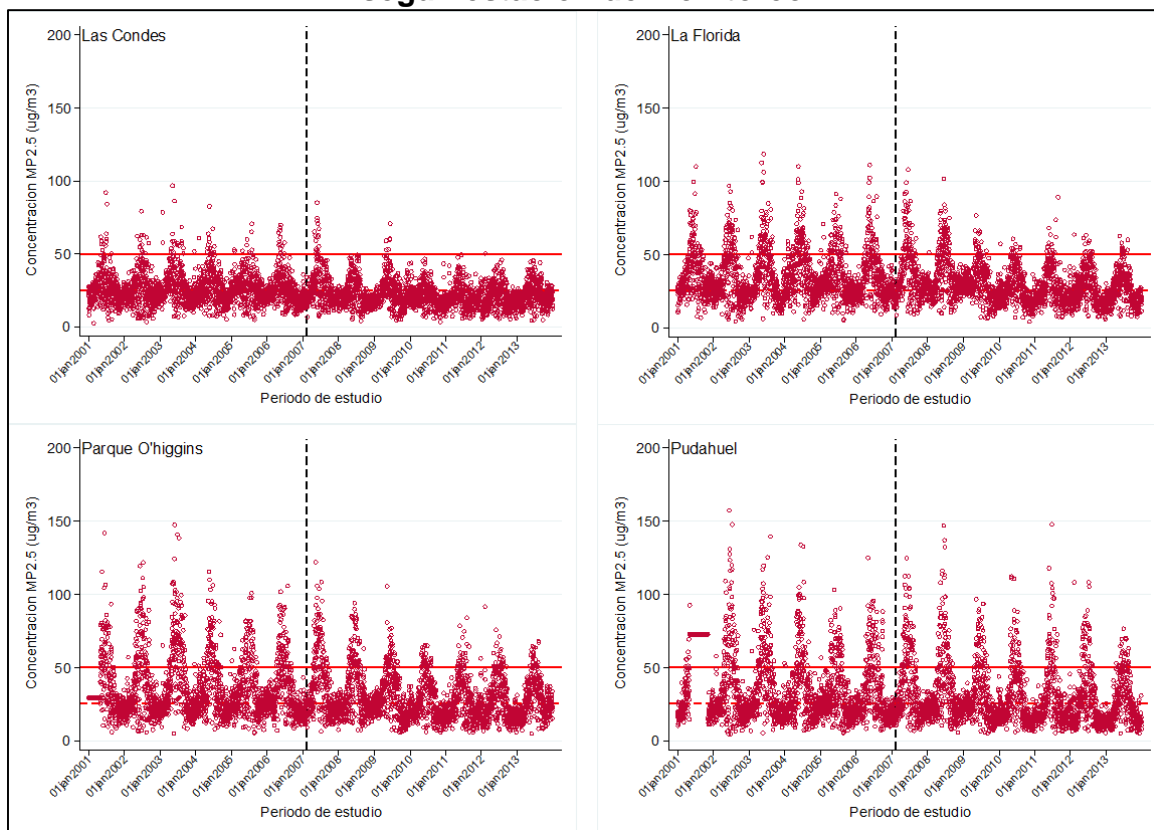
Las series de tiempo de las concentraciones máximas diarias de  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$  para cada estación de monitoreo se pueden revisar en la sección Anexos (Figuras A 1 y A 2), las cuales muestran un patrón similar a lo descrito para las concentraciones diarias, no obstante, el aparente descenso posterior a la implementación del TS observado para el  $MP_{2,5}$  es mucho más marcado.

**Figura 13. Serie de tiempo de las concentraciones medias diarias de MP<sub>10</sub> según estación de monitoreo.**



Línea roja continua: estándar diario chileno (MP<sub>10</sub>: 150 µg/m<sup>3</sup>); línea roja punteada: valor guía OMS (MP<sub>10</sub>: 50 µg/m<sup>3</sup>); línea vertical negra: implementación TS (10 de febrero de 2007)

**Figura 14. Serie de tiempo de las concentraciones medias diarias de MP<sub>2,5</sub> según estación de monitoreo.**



Línea roja continua: estándar anual chileno (MP<sub>2,5</sub>: 50 µg/m<sup>3</sup>); línea roja punteada: valor guía OMS (MP<sub>2,5</sub>: 25 µg/m<sup>3</sup>); línea vertical negra: implementación TS (10 de febrero de 2007)

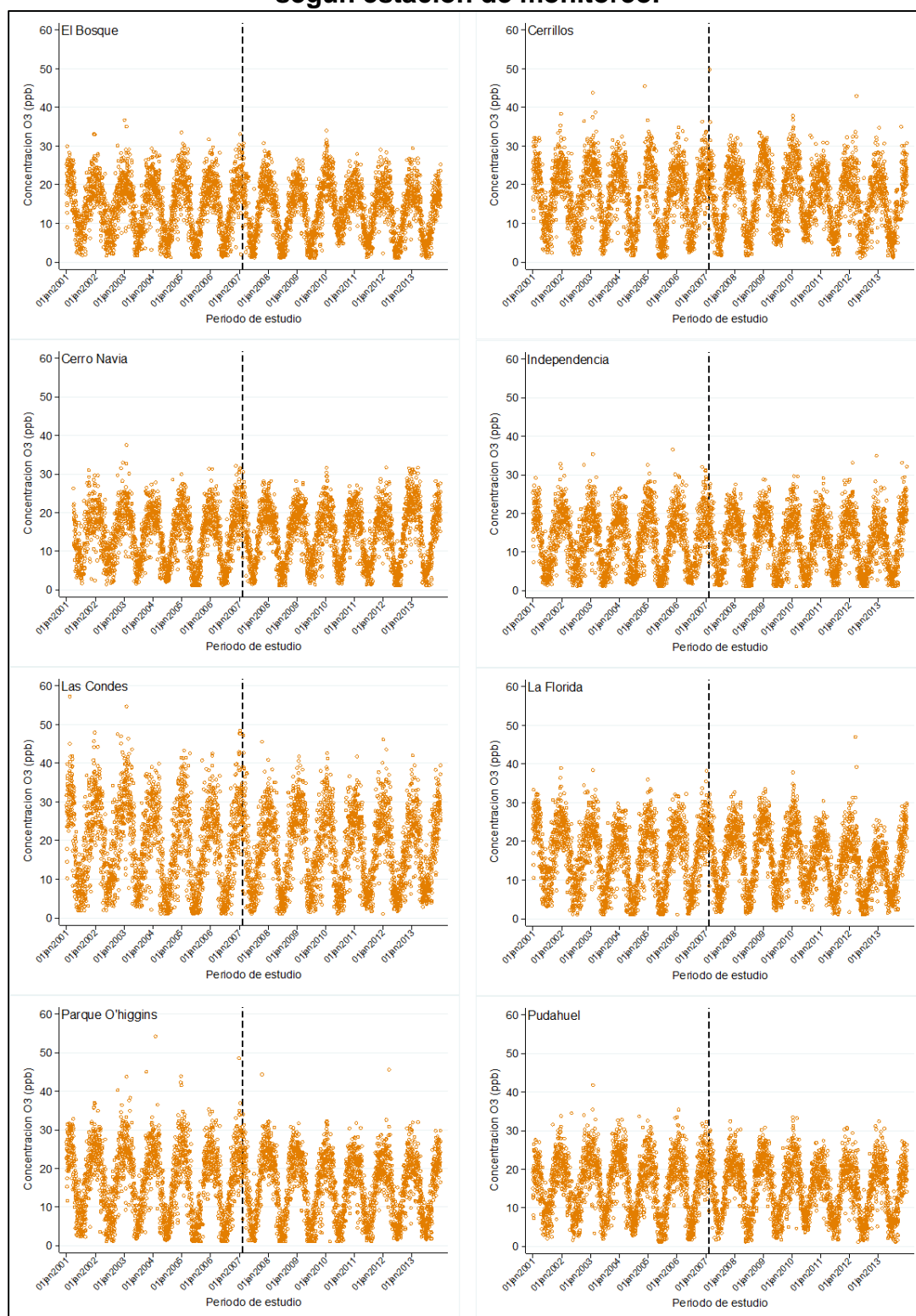
Las Figuras 15 y 16 muestran los gráficos de serie de tiempo de las concentraciones diarias de O<sub>3</sub> y CO para cada estación de monitoreo. Se puede observar que, al igual que el MP, ambos contaminantes tuvieron un patrón estacional marcado, sin embargo, el CO mostró el mismo patrón que el MP, mientras que el O<sub>3</sub> registró valores más altos en los meses cálidos y más bajos en los meses fríos.

En general, las series de tiempo de las concentraciones diarias de O<sub>3</sub> se aprecian bastante similares entre las estaciones de monitoreo, aunque se destacan las estaciones LC y PO que registraron valores sobre los 40 ppb. Las tendencias en las concentraciones diarias de este contaminante muestran principalmente una mantención de los niveles posterior a la implementación del TS.

Las series de tiempo de las concentraciones de CO muestran diferencias entre las estaciones de monitoreo, donde las estaciones con las concentraciones diarias más altas fueron CN, PO, PU y la estación con las concentraciones más bajas fue LC con valores muy inferiores al resto de las estaciones de monitoreo. Las tendencias en las concentraciones diarias de este contaminante muestran un aparente descenso posterior a la implementación del TS, especialmente en las estaciones CE, CN y PO.

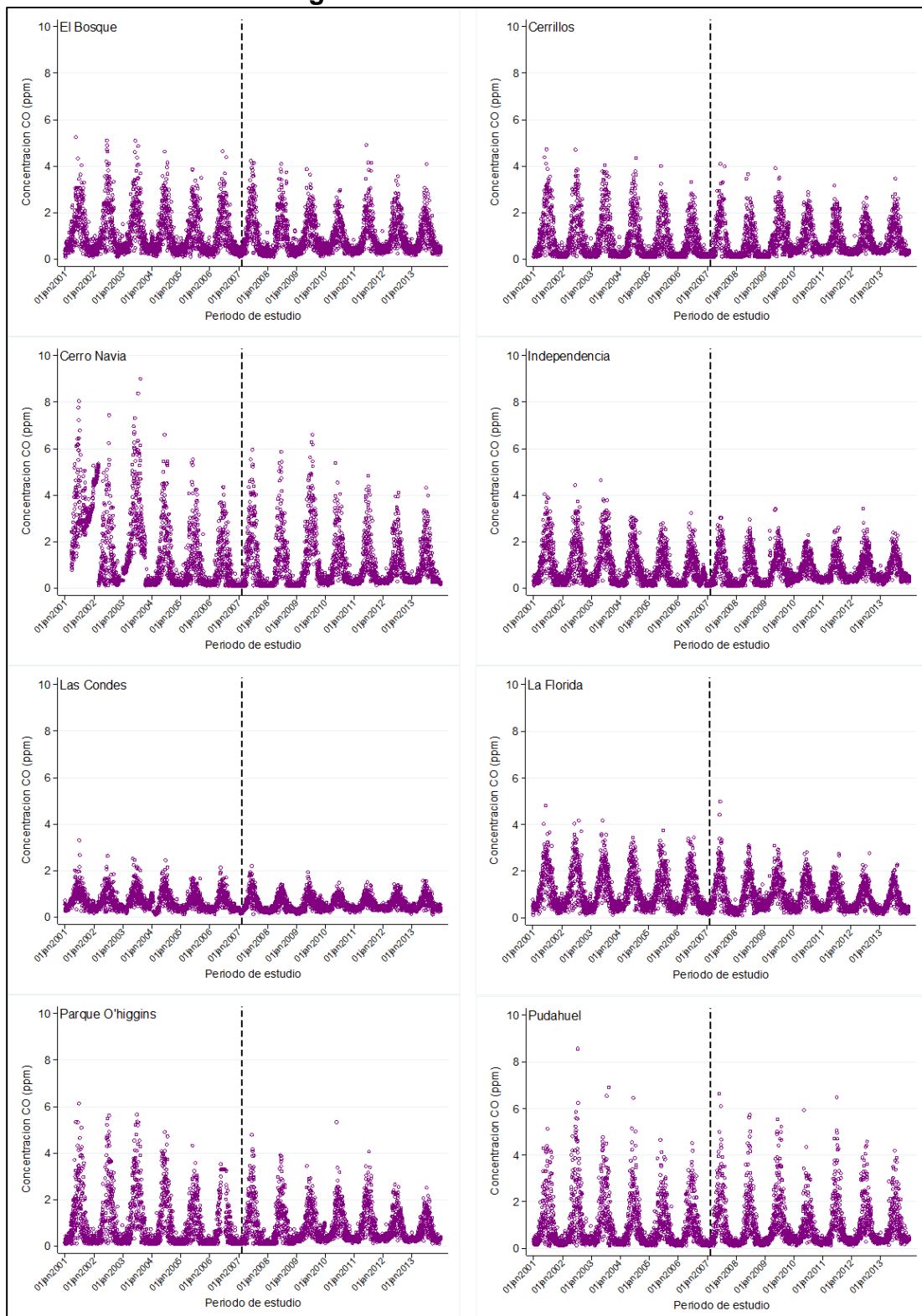
Las series de tiempo de las concentraciones máximas diarias de O<sub>3</sub> y CO para cada estación de monitoreo se pueden revisar en los anexos (Figuras A 3 y A 4), las cuales muestran un patrón similar a lo descrito para las concentraciones diarias, no obstante, el aparente descenso posterior a la implementación del TS observado para el CO es mucho menos marcado.

**Figura 15. Serie de tiempo de las concentraciones medias diarias de O<sub>3</sub> según estación de monitoreo.**



Línea vertical negra: implementación TS (10 de febrero de 2007)

**Figura 16. Serie de tiempo de las concentraciones medias diarias de CO según estación de monitoreo.**



Línea vertical negra: implementación TS (10 de febrero de 2007)



Finalmente, en base al análisis realizado para cumplir con el OE 1 se puede concluir lo siguiente:

1. Las medianas de las concentraciones diarias de  $MP_{10}$  fluctuaron entre 51-71  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en el período previo a la implementación de TS y entre 50-68  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en el período posterior. Por otro lado, las medianas de concentraciones de  $MP_{2,5}$  fluctuaron entre 24-30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en el período previo y entre 20-25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en el período posterior. Ambos contaminantes mostraron disminución de sus concentraciones en el período posterior a la implementación de TS en la mayoría de las estaciones de monitoreo.
2. Las medianas de concentraciones diarias de CO fluctuaron entre 0,4-0,9 ppm en el período previo a TS, mientras que en el período posterior fueron bastante similares (0,5-0,6 ppm); solo 4 estaciones de monitoreo mostraron disminuciones en sus concentraciones posterior a TS. Por otro lado, las medianas de las concentraciones de  $O_3$  fluctuaron entre 13-19 ppb en el período previo a TS y entre 12-18 ppb en el período posterior; la mayoría de las estaciones mostraron disminución de sus concentraciones en el período posterior a TS.
3. Se observó una gran diferencia en el número de superaciones de la normativa diaria de  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$  entre las estaciones de monitoreo, con diferencias de más de 5 veces entre algunas estaciones. En la mayoría de las estaciones disminuyó el número de superaciones de la normativa diaria posterior a TS.
4. La normativa anual de  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$  fue superada por todas las estaciones de monitoreo en todo el período de estudio, solo una estación mostró tener valores cercanos a la normativa anual. Se observó una aparente disminución de las concentraciones anuales de  $MP_{2,5}$  posterior a TS.
5. Las superaciones de las normativas de  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$  (diaria y anual), fueron bastante frecuentes y heterogéneas entre las estaciones de monitoreo.

6. Las series de tiempo mostraron un patrón estacional marcado con valores más altos en la temporada fría, excepto para O<sub>3</sub>.
7. Las tendencias de las concentraciones para el MP<sub>2,5</sub> y CO muestran un aparente descenso posterior a la implementación de TS en las series de tiempo.
8. En general, se observó bastante heterogeneidad en las concentraciones de los contaminantes estudiados entre las estaciones de monitoreo, lo que podría representar una desigualdad en la distribución de los contaminantes entre los distintos territorios.

### 9.3. OE 2. Estimar el impacto de la introducción de la reforma al transporte público (TS) en la calidad del aire en Santiago, Chile

Para estimar el impacto de la introducción de TS en la calidad del aire se utilizaron las concentraciones medias y máximas mensuales de los promedios diarios de los contaminantes  $MP_{10}$ ,  $MP_{2,5}$ ,  $O_3$  y  $CO$ .

La Tabla 17 muestra las medidas de resumen de las concentraciones medias mensuales de los contaminantes estudiados comparando los valores del período previo y posterior a la implementación de TS, abarcando 72 meses en cada período. Las medianas de las concentraciones mensuales de  $MP_{10}$  mostraron los mayores valores en las estaciones CN y LF en el período previo a TS, y las estaciones LF y BO en el período posterior; el menor valor se registró en la estación LC en ambos períodos. Comparando los valores pre intervención y post intervención, casi todas las estaciones de monitoreo disminuyeron sus concentraciones, no obstante, solo CN (77,4 a 61,1  $\mu g/m^3$ ) y LC (50,6 a 48,5  $\mu g/m^3$ ) mostraron diferencias significativas.

Las medianas de las concentraciones mensuales de  $MP_{2,5}$  mostraron su mayor valor en la estación LF y el menor valor se registró en la estación LC en ambos períodos. Todas las estaciones de monitoreo disminuyeron significativamente sus concentraciones comparando los valores previos con los posteriores a la intervención.

Por otro lado, las medianas de las concentraciones mensuales de  $O_3$  mostraron los mayores valores en las estaciones LC y CE, y el menor valor se registró en la estación IN en ambos períodos. Todas las estaciones de monitoreo disminuyeron sus concentraciones comparando los valores previos con los posteriores a la intervención, aunque ninguna disminución fue significativa.

Las medianas de las concentraciones mensuales de  $CO$  fueron muy similares en el período previo a TS (0,5-0,8 ppm), sin embargo, la estación CN mostró un valor bastante superior (1,2 ppm); en el período posterior a la intervención los valores

fluctuaron entre 0,5 y 0,7 ppm. La mayoría de las estaciones de monitoreo mostraron una disminución en sus valores, no obstante, solo CN (1,2 a 0,6 ppm) y LC (0,6 a 0,5 ppm) fueron significativas.

Cabe recordar que el hecho de comparar resultados de estadísticas de resumen previas y posterior a la intervención es muy limitante dada la gran cantidad de información contenida en una serie de tiempo, sin embargo, este análisis es útil para hacer una descripción general y comparación de los datos.

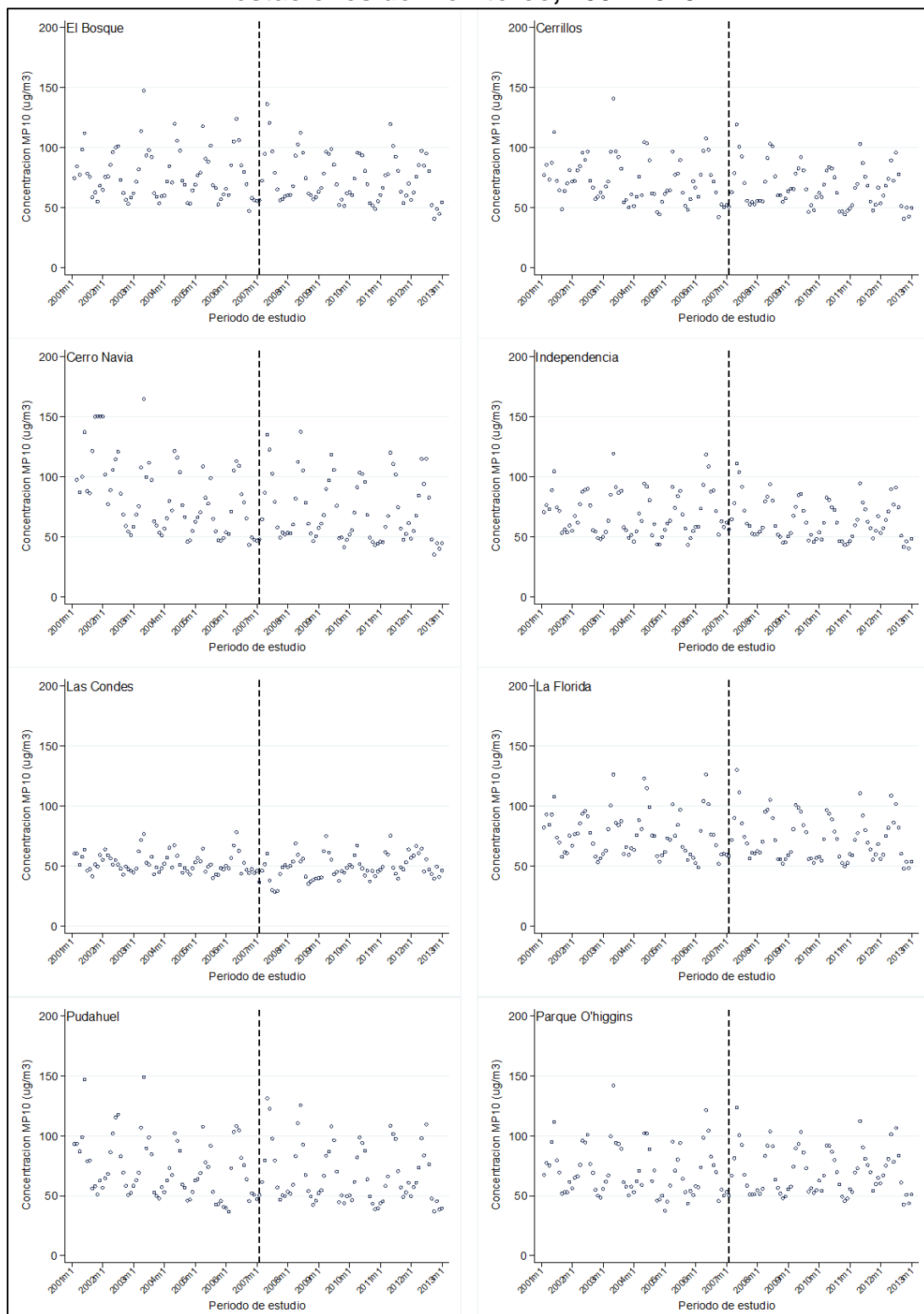
Las Figuras 17, 18, 19 y 20, incluyen gráficos de dispersión de la serie temporal de las medias mensuales de cada contaminante según estación de monitoreo, éstos ayudan a identificar de manera descriptiva, la tendencia, los patrones estacionales y el ciclo. Las figuras, en general, indican que la tendencia previa a la intervención fue hacia la disminución o mantención de las concentraciones de contaminantes. Los contaminantes  $MP_{2,5}$  y CO, en general, muestran una tendencia hacia la disminución de las concentraciones posterior a la intervención en casi todas las estaciones de monitoreo, mientras que el  $MP_{10}$  y el  $O_3$  no muestran alguna tendencia posterior a la intervención. Todos los contaminantes, en todas las estaciones de monitoreo, mostraron un claro patrón estacional con mayores concentraciones en los meses de otoño-invierno para los contaminantes  $MP_{10}$ ,  $MP_{2,5}$  y CO, y en los meses de primavera-verano en el caso del  $O_3$ . En los 13 años que constituyen la serie temporal de estas figuras, no parece haber ningún efecto cíclico, es decir, no se ve un comportamiento que se manifieste de forma constante durante un período mayor que un año.

**Tabla 17. Estadísticas descriptivas de las medias mensuales de los contaminantes MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub>, O<sub>3</sub> y CO y comparación entre el período previo y posterior a la intervención (TS).**

	Pre-intervención n=72		Post-intervención n=72		p-valor*
	Media (DE)	P <sub>50</sub> (min-max)	Media (DE)	P <sub>50</sub> (min-max)	
<b>MP<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>					
BO	77,8 (20,7)	72,9 (60,9-91,5)	74,0 (20,2)	68,7 (58,1-93,0)	0,2354
CE	72,7 (19,0)	71,1 (59,2-85,1)	67,0 (17,4)	63,4 (52,8-78,0)	0,0562
CN	83,5 (30,6)	77,4 (57,2-105,4)	71,6 (26,6)	61,1 (49,4-92,9)	<b>0,0112</b>
IN	69,3 (18,4)	63,4 (54,8-86,1)	63,7 (16,4)	59,6 (50,4-74,9)	0,0546
LC	52,6 (8,3)	50,6 (46,8-57,5)	49,4 (10,2)	48,5 (42,1-55,9)	<b>0,0310</b>
LF	76,4 (18,6)	75,3 (60,3-86,9)	72,8 (18,8)	69,5 (56,8-86,2)	0,1382
PO	70,6 (21,1)	65,7 (53,7-85,8)	69,6 (19,1)	65,9 (53,8-83,3)	0,8230
PU	72,5 (24,7)	65,9 (52,9-88,6)	67,4 (24,1)	58,7 (49,4-83,5)	0,1240
<b>MP<sub>2,5</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>					
LC	25,9 (5,7)	25,2 (21,6-29,4)	21,9 (5,3)	20,6 (18,3-24,7)	<b>&lt;0,001</b>
LF	34,2 (11,0)	32,0 (24,8-42,0)	29,5 (9,9)	28,5 (22,0-35,5)	<b>0,0068</b>
PO	35,3 (14,8)	29,8 (23,4-43,6)	29,1 (11,7)	25,3 (20,6-36,4)	<b>0,0056</b>
PU	36,2 (18,0)	28,8 (21,5-48,2)	29,5 (14,6)	23,5 (18,9-39,4)	<b>0,0127</b>
<b>O<sub>3</sub> (ppb)</b>					
BO	14,5 (5,8)	16,0 (8,8-19,5)	13,7 (5,9)	14,6 (8,0-18,5)	0,3083
CE	17,1 (6,6)	19,3 (10,6-22,9)	16,9 (6,5)	17,9 (10-22,1)	0,7675
CN	14,0 (5,8)	15,9 (8,8-18,9)	14,1 (6,1)	15,8 (7,9-19,0)	0,9090
IN	13,1 (6,0)	14,0 (7,5-18,5)	12,4 (5,7)	13,4 (6,4-17,8)	0,3623
LC	19,1 (8,8)	19,5 (11,5-26,7)	17,6 (8,1)	18,3 (9,0-25,4)	0,2667
LF	16,1 (6,7)	17,7 (9,9-21,8)	15,1 (6,5)	16,1 (9,2-20,4)	0,3276
PO	16,5 (7,6)	18,5 (9,0-23,8)	15,0 (7,0)	16,1 (7,9-20,9)	0,1074
PU	16,1 (6,1)	17,6 (10,3-21,3)	15,0 (5,9)	16,6 (8,8-20,0)	0,1561
<b>CO (ppm)</b>					
BO	1,0 (0,7)	0,8 (0,5-1,7)	0,9 (0,6)	0,6 (0,4-1,5)	0,3161
CE	0,8 (0,7)	0,5 (0,2-1,3)	0,7 (0,5)	0,5 (0,3-1,2)	0,7221
CN	1,5 (1,4)	1,2 (0,3-2,6)	1,0 (0,9)	0,6 (0,3-1,6)	<b>0,0203</b>
IN	0,9 (0,6)	0,7 (0,3-1,4)	0,7 (0,5)	0,6 (0,4-1,2)	0,5543
LC	0,7 (0,3)	0,6 (0,4-0,9)	0,6 (0,2)	0,5 (0,4-0,7)	<b>0,0416</b>
LF	1,1 (0,6)	0,8 (0,5-1,7)	0,9 (0,5)	0,7 (0,4-1,3)	0,0709
PO	0,9 (0,9)	0,6 (0,2-1,6)	0,8 (0,6)	0,5 (0,3-1,2)	0,9713
PU	0,9 (0,7)	0,6 (0,3-1,5)	0,9 (0,7)	0,6 (0,3-1,5)	0,9809

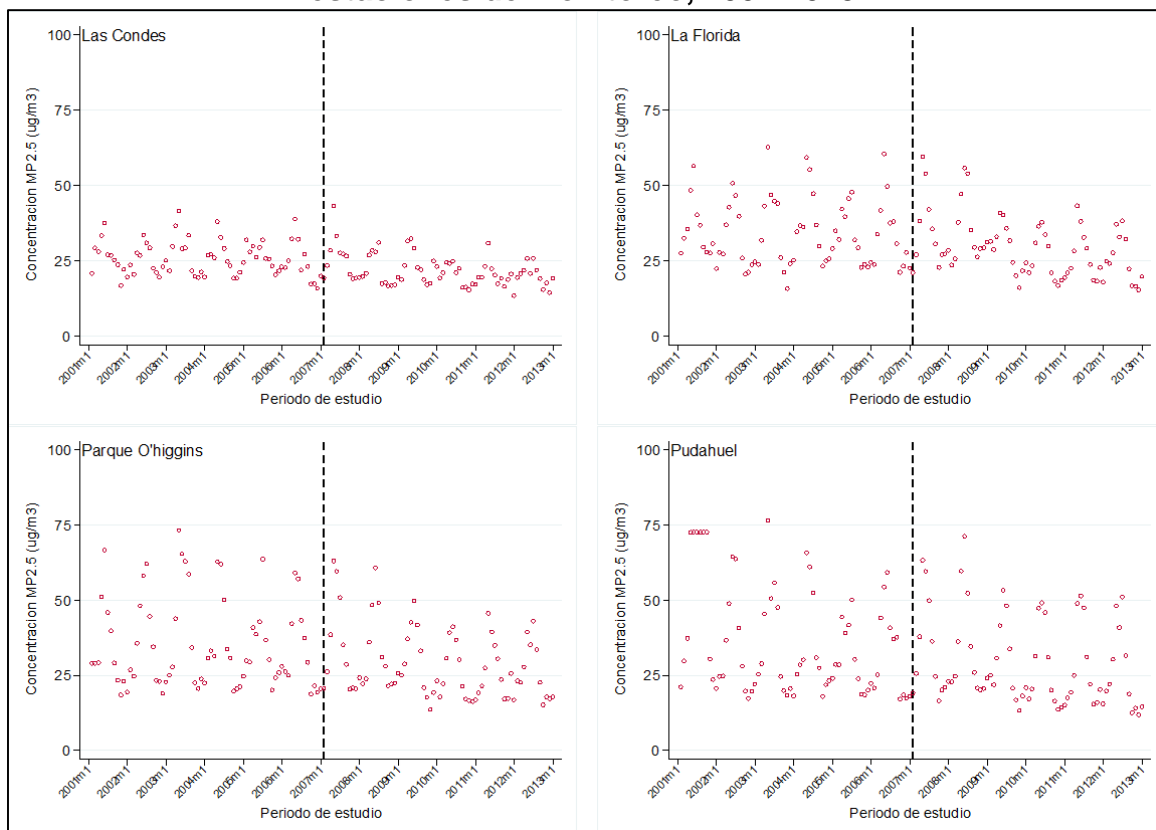
Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU); \*Test de Mann-Whitney, en negritas valores significativos (p<0,05)

**Figura 17. Gráficos de dispersión de las medias mensuales de MP<sub>10</sub> según estaciones de monitoreo, 2001-2013.**



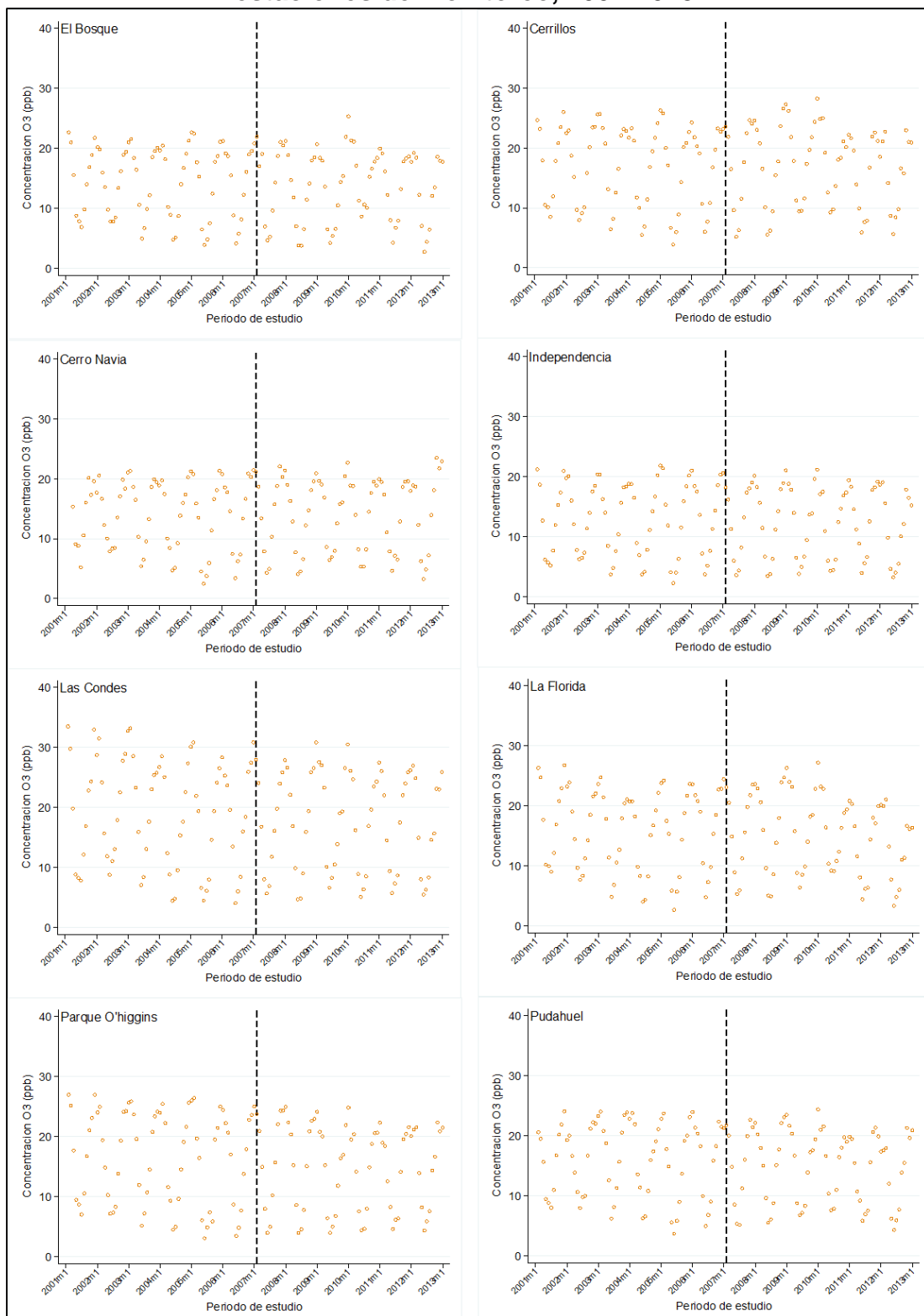
Línea vertical negra: introducción de TS.

**Figura 18. Gráficos de dispersión de las medias mensuales de MP<sub>2,5</sub> según estaciones de monitoreo, 2001-2013.**



Línea vertical negra: introducción de TS.

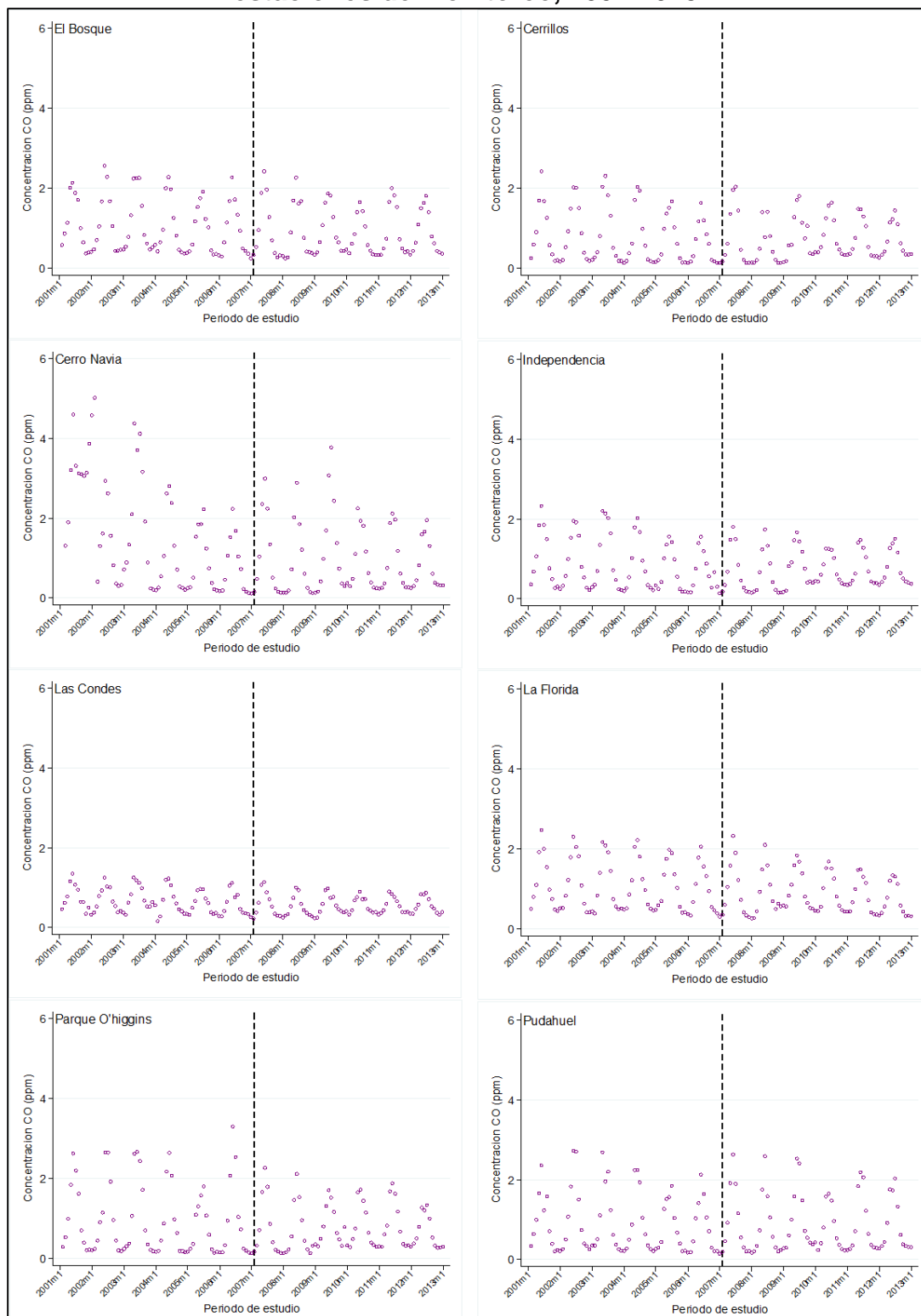
**Figura 19. Gráficos de dispersión de las medias mensuales de O<sub>3</sub> según estaciones de monitoreo, 2001-2013.**



Línea vertical negra: introducción de TS.



**Figura 20. Gráficos de dispersión de las medias mensuales de CO según estaciones de monitoreo, 2001-2013.**



Línea vertical negra: introducción de TS.

Las medidas de resumen de las concentraciones máximas mensuales de los contaminantes MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub>, O<sub>3</sub> y CO se detallan en Anexos (Tabla A 9). Brevemente, los resultados fueron similares a los de las concentraciones medias, con reducciones más marcadas en el período posterior a la intervención comparado con el previo y una distribución heterogénea de los valores entre estaciones de monitoreo.

Los gráficos de dispersión de la serie temporal de los máximos mensuales de cada contaminante según estación de monitoreo se pueden revisar en las Figuras A 5-8 en la sección Anexos. En general, las figuras indican que la tendencia previa a la intervención fue hacia la disminución para los contaminantes MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub> y CO, mientras que el O<sub>3</sub> mostró una mantención de las concentraciones de contaminantes. Los contaminantes MP<sub>2,5</sub> y CO, en general, exhibieron una tendencia hacia la disminución de las concentraciones máximas posterior a la intervención en casi todas las estaciones de monitoreo, mientras que el MP<sub>10</sub> y el O<sub>3</sub> no mostraron una tendencia clara post intervención.

La Tabla 18 muestra las medias mensuales de las variables climáticas según estación de monitoreo, comparando los valores del período previo y posterior a la implementación de TS, abarcando 72 meses en cada período. Las variables de temperatura, en general mostraron poca variabilidad entre las estaciones de monitoreo y entre ambos períodos de estudio; las medianas de la temperatura media oscilaron entre 15,2 y 19,2°C en el período previo a la intervención, mientras que en el período posterior oscilaron entre 14 y 19,6°C, con diferencias entre los valores mínimos y máximos de 8-11°C. Las temperaturas mínimas oscilaron entre 9,5 y 11,9°C en el período pre intervención, mientras que en el período post intervención osciló entre 7,5 y 10,8°C, con diferencias entre los valores mínimos y máximos de 5-8°C. Las temperaturas máximas mensuales oscilaron entre 22,3 y 29,3°C en el período pre intervención, mientras que en el período post intervención osciló entre 21,9 y 23,8°C, con diferencias entre los valores mínimos y máximos de 9-13°C. La estación CN mostró consistentemente una disminución significativa en los valores de los 3 indicadores de temperatura.

La velocidad del viento también mostró poca variabilidad entre las estaciones de monitoreo y entre los períodos pre y post intervención, con medianas de valores entre 0,8 y 2,2 m/s, siendo el valor mínimo de 0,7 m/s y el máximo de 2,9 m/s. Estos valores se clasifican como una brisa débil y suave, según la escala internacional del viento de Beaufort (grados 1 y 2, respectivamente) (Matthews 2014). Las estaciones LC y PU mostraron una leve disminución significativa en los valores de velocidad de viento comparando ambos períodos, mientras que LF mostró un leve aumento significativo.

Las medianas de los valores de humedad relativa oscilaron entre 58,4 y 70,2% en el período pre intervención, mientras que en el período post intervención oscilaron entre 58 y 60,6%, con diferencias entre los valores mínimos y máximos de 11-18%. En general, las estaciones de monitoreo mostraron una disminución en las medianas de los valores de humedad relativa, siendo significativas BO, CE, IN y LC.

**Tabla 18. Estadísticas descriptivas de las medias mensuales de las variables climáticas y comparación entre el período previo y posterior a la intervención (TS).**

	Pre-intervención		Post-intervención		p-valor*
	Media (DE)	P <sub>50</sub> (min-max)	Media (DE)	P <sub>50</sub> (min-max)	
<b>T° media (°C)</b>					
BO	16,6 (4,6)	16,2 (12,0-21,0)	15,8 (4,9)	16,1 (11,6-20,6)	0,4659
CE	16,7 (4,1)	16,7 (12,3-20,9)	16,4 (4,5)	16,3 (12,3-20,7)	0,7295
CN	19,2 (5,2)	19,2 (13,8-24,1)	12,4 (8,7)	14,0 (8,5-19,5)	<b>0,0001</b>
IN	17,3 (4,4)	17,1 (12,5-21,8)	16,8 (4,8)	16,9 (12,3-21,5)	0,5975
LC	15,7 (4,1)	15,2 (11,3-19,9)	15,3 (4,8)	15,0 (10,8-19,6)	0,6062
LF	17,6 (4,5)	17,4 (12,8-22,1)	15,6 (5,2)	15,4 (11,0-20,4)	<b>0,0436</b>
PO	16,9 (4,3)	16,6 (12,3-20,9)	15,6 (4,9)	15,5 (11,6-20,3)	0,1932
PU	16,7 (4,3)	16,5 (12,1-21,2)	16,4 (4,8)	16,5 (12,1-21,0)	0,7014
<b>T° mínima (°C)</b>					
BO	10,8 (3,6)	10,2 (7,8-13,7)	9,4 (4,1)	9,3 (6,4-13,1)	0,1518
CE	11,3 (3,0)	11,0 (8,5-14,3)	10,5 (3,8)	10,3 (7,3-13,9)	0,3299
CN	12,0 (3,7)	11,9 (8,7-15,2)	6,7 (6,1)	7,5 (3,2-11,6)	<b>&lt;0,001</b>
IN	11,8 (3,2)	11,6 (8,7-15,0)	10,9 (4,0)	10,8 (7,5-14,7)	0,2087
LC	10,1 (3,0)	9,5 (7,4-12,8)	9,4 (3,8)	9,0 (6,0-12,5)	0,2852
LF	11,5 (3,7)	11,0 (8,5-14,6)	9,0 (4,4)	9,1 (5,1-13,0)	<b>0,0060</b>
PO	11,1 (3,2)	10,8 (8,4-14,2)	9,2 (4,0)	9,3 (6,4-12,8)	<b>0,0200</b>
PU	10,7 (3,3)	10,3 (7,8-14,2)	10,2 (4,1)	10,3 (6,4-13,8)	0,5173
<b>T° máxima (°C)</b>					
BO	23,2 (5,3)	23,3 (17,5-28,3)	23,0 (5,4)	23,2 (17,8-28,2)	0,8504
CE	22,9 (4,9)	23,2 (17,7-27,7)	23,0 (5,1)	23,2 (18,1-27,8)	0,9499
CN	27,7 (6,0)	29,3 (21,8-33,0)	19,0 (11,4)	22,1 (15,4-28,0)	<b>&lt;0,001</b>
IN	23,6 (5,2)	23,9 (18,1-29,0)	23,6 (5,5)	23,8 (17,9-28,9)	0,9799
LC	22,3 (5,0)	22,3 (16,9-27,5)	22,2 (5,5)	21,9 (16,5-27,2)	0,8850
LF	24,3 (5,0)	24,8 (19,0-29,1)	23,0 (5,7)	23,0 (17,4-28,3)	0,2179
PO	23,4 (5,0)	23,6 (17,9-28,3)	22,8 (5,5)	22,8 (17,9-28,0)	0,6418
PU	23,3 (5,1)	23,5 (17,8-28,5)	23,4 (5,4)	23,7 (18,0-28,6)	0,9000
<b>Velocidad del viento (m/s)</b>					
BO	1,5 (0,3)	1,5 (1,2-1,7)	1,4 (0,4)	1,4 (1,1-1,8)	0,3996
CE	2,2 (0,6)	2,1 (1,5-2,8)	2,2 (0,7)	2,2 (1,4-2,9)	0,9900
CN	-	-	1,2 (0,8)	1,0 (0,7-1,8)	-
IN	1,1 (0,2)	1,1 (0,9-1,3)	1,1 (0,3)	1,1 (0,8-1,3)	0,2087
LC	1,3 (0,1)	1,4 (1,3-1,4)	1,3 (0,1)	1,3 (1,2-1,3)	<b>0,0007</b>
LF	0,8 (0,1)	0,8 (0,7-0,9)	1,1 (0,2)	1,1 (1,0-1,3)	<b>&lt;0,001</b>
PO	1,3 (0,4)	1,3 (1,0-1,6)	1,2 (0,4)	1,2 (0,9-1,6)	0,3017
PU	2,1 (0,8)	2,0 (1,3-2,5)	1,6 (0,5)	1,6 (1,2-2,1)	<b>0,0066</b>
<b>Humedad relativa (%)</b>					
BO	66,1 (10,1)	64,8 (58,7-73,9)	60,2 (8,1)	58,8 (53,2-67,1)	<b>0,0038</b>
CE	70,0 (10,5)	70,2 (62,3-78,9)	61,8 (8,7)	60,6 (55,1-69,6)	<b>0,0001</b>
CN	-	-	51,1 (23,8)	59,5 (50,7-63,9)	-
IN	63,0 (11,3)	62,8 (54,2-72,8)	57,5 (9,4)	56,6 (50,5-66,2)	<b>0,0147</b>
LC	63,3 (7,2)	62,5 (58,8-69,4)	58,6 (5,9)	59,9 (53,9-63,1)	<b>0,0023</b>
LF	59,8 (10,3)	58,4 (51,6-68,6)	59,4 (8,4)	58,0 (52,8-67,2)	0,8455
PO	63,8 (10,5)	63,0 (55,9-72,6)	60,7 (8,8)	60,1 (54,6-68,1)	0,1330
PU	64,7 (10,5)	63,3 (56,6-74,6)	60,6 (9,8)	58,4 (53,3-69,7)	0,0544

Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU); \*test de Mann-Whitney, en negritas valores significativos (p<0,05)

La Tabla 19 muestra los coeficientes estimados de los modelos basales y ajustados de STI para las medias mensuales de  $MP_{10}$ ,  $MP_{2,5}$ ,  $O_3$  y CO según estaciones de monitoreo (los resultados con sus intervalos de confianza se muestran en la sección Anexos, Tabla A 10 y Tabla A 11).

Los resultados del modelo ajustado para las medias mensuales de  $MP_{10}$ , en general, muestran que las concentraciones iniciales ( $Int(B_0)$ ) fueron similares a lo encontrado en el análisis descriptivo, donde LC mostró la mayor concentración inicial ( $53,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y CN la mayor concentración de inicio ( $105,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). La tendencia de las concentraciones mensuales durante el período previo a la intervención ( $T(B_1)$ ) mostraron ir disminuyendo significativamente en CE, CN y PU ( $-0,13$ ,  $-0,43$  y  $-0,26 \mu\text{g}/\text{m}^3$  mensual, respectivamente). Las concentraciones en el primer mes posterior a la intervención ( $X_t(B_2)$ ), mostraron un comportamiento contrario a lo que se esperaba, con un aumento significativo en 2 estaciones (CN:  $5,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y PU:  $8,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y solo una estación mostró una disminución (LC:  $-7,46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). La tendencia de las concentraciones posterior a la intervención ( $T^*X(B_3)$ ), fue hacia la disminución en 3 estaciones (significativa en BO:  $-0,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$  mensual), mientras que en 5 estaciones fue hacia un aumento (significativo en LC:  $0,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$  mensual). Finalmente, a partir de la estimación combinada ( $Tend$ ), se puede observar que la tendencia final, considerando la tendencia pre y post intervención, las concentraciones medias mensuales de  $MP_{10}$  disminuyeron en las estaciones BO ( $-0,12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), CE ( $-0,11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), CN ( $-0,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y PU ( $-0,13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y aumentaron en LC ( $0,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). La Figura 21 proporciona una aproximación visual de estos resultados.

Con respecto a los resultados del modelo ajustado para las medias mensuales de  $MP_{2,5}$ , la menor concentración inicial se observó en LC ( $26,39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y la mayor en PU ( $44,67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). En todas las estaciones, las tendencias de las concentraciones previas a la intervención mostraron ir disminuyendo cada mes, no obstante, la disminución fue significativa solo para PU ( $-0,24 \mu\text{g}/\text{m}^3$  mensual). Las concentraciones en el primer mes posterior a la intervención mostraron una

disminución en 2 estaciones (LC y PO), mientras que otras 2 mostraron un aumento (solo significativo en PU:  $6,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). La tendencia de las concentraciones posterior a la intervención, fue hacia la disminución en 3 estaciones de monitoreo (significativas en LC:  $-0,06$ , LF:  $-0,17$  y PO:  $-0,11 \mu\text{g}/\text{m}^3$  mensual). Por último, se puede observar que la tendencia final de las concentraciones mensuales de  $\text{MP}_{2,5}$  fue hacia la disminución (significativa), entre  $-0,08$  y  $-0,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$  mensual en todas las estaciones incluidas. La Figura 22 proporciona una aproximación visual de estos resultados.

Los resultados del modelo ajustado para las medias mensuales de  $\text{O}_3$ , mostraron que las tendencias de las concentraciones disminuyeron durante el período previo a la intervención en todas las estaciones, entre  $-0,019$  y  $-0,056$  ppb mensual (disminución significativa en BO, CE, CN, LC y LF). Las concentraciones en el primer mes posterior a la intervención mostraron un aumento entre  $0,32$  y  $2,65$  ppb, siendo significativos los aumentos en las estaciones CE y LF. La tendencia de las concentraciones posterior a la intervención fue hacia la disminución en 4 estaciones de monitoreo y hacia un aumento en las 4 estaciones restantes, ninguno de estos resultados fue significativo. La tendencia final, considerando la tendencia pre y post intervención de las concentraciones medias mensuales de  $\text{O}_3$ , disminuyó significativamente entre  $-0,019$  y  $-0,068$  ppb mensuales, en CE, IN, LC, LF, PO y PU. La Figura 23 proporciona una aproximación visual de estos resultados.

Finalmente, los resultados del modelo ajustado para las medias mensuales de CO, mostraron que la tendencia de concentraciones durante el período previo a la intervención disminuyó en todas las estaciones, entre  $-0,003$  y  $-0,034$  ppb mensual (disminución significativa en BO, CE, CN, IN, LC, LF y PU). Las concentraciones inmediatamente posteriores a la intervención, en general, mostraron un aumento (solo significativo en CN:  $0,734$  ppm). La tendencia de las concentraciones posterior a la intervención fue hacia un aumento entre  $0,003$  y  $0,031$  ppm mensual (significativo en BO, CE, CN, IN y LC). La tendencia final, considerando la tendencia pre y post intervención de las concentraciones medias mensuales de  $\text{O}_3$ , disminuyó

significativamente sólo en LF (-0,003 ppm mensual). La Figura 24 proporciona una aproximación visual de estos resultados.

En general, los modelos ajustados por estacionalidad y autocorrelación redujeron la magnitud de los estimadores en comparación con el modelo basal, para los contaminantes  $MP_{10}$ ,  $MP_{2,5}$  y CO.

Los coeficientes estimados de los modelos basales y ajustados de STI con sus intervalos de confianza para los máximos mensuales de  $MP_{10}$ ,  $MP_{2,5}$ ,  $O_3$  y CO según estaciones de monitoreo se detallan en la sección Anexos (Tabla A 12 y Tabla A 13), cuyos resultados fueron bastante similares a los observados para las medias mensuales de los contaminantes, aunque con diferente magnitud.

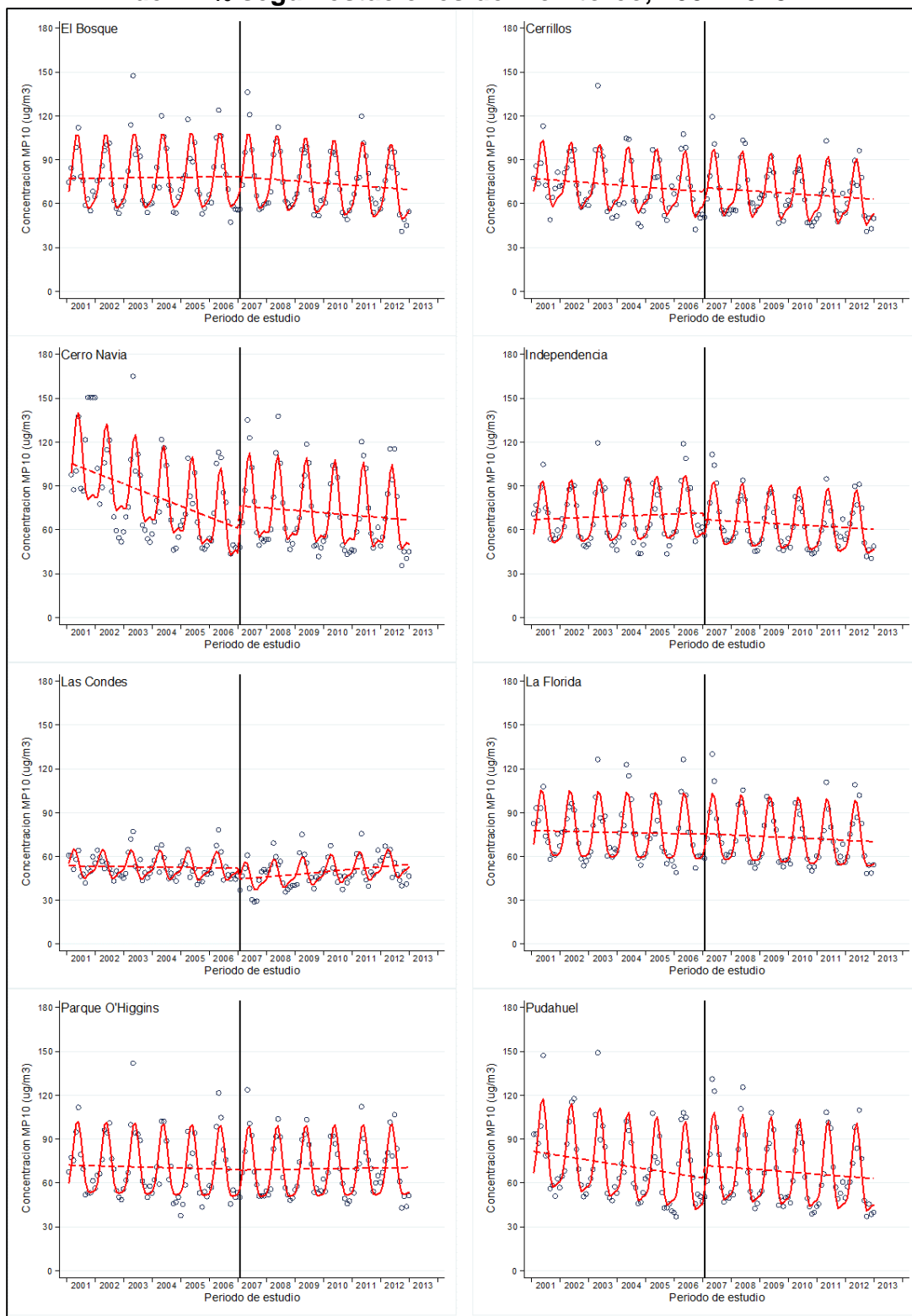
**Tabla 19. Coeficientes estimados de los modelos basales y ajustados de STI para las medias mensuales de MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub>, O<sub>3</sub> y CO.**

	Modelo basal					Modelo Ajustado				
	Int (B <sub>0</sub> )	T (B <sub>1</sub> )	X <sub>t</sub> (B <sub>2</sub> )	T*X (B <sub>3</sub> )	Tend	Int (B <sub>0</sub> )	T (B <sub>1</sub> )	X <sub>t</sub> (B <sub>2</sub> )	T*X (B <sub>3</sub> )	Tend
<b>MP<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>										
BO	80,24	-0,07	6,1	-0,14	-0,21	77,12	0,02	-0,22	<b>-0,14</b>	<b>-0,12</b>
CE	79,46	<b>-0,19</b>	7,4	0,02	-0,17	77,18	<b>-0,13</b>	2,77	0,02	<b>-0,11</b>
CN	108,91	<b>-0,73</b>	<b>21,6</b>	<b>0,52</b>	-0,21	105,3	<b>-0,43</b>	<b>5,92</b>	0,50	<b>-0,14</b>
IN	69,42	-0,004	0,3	-0,16	-0,16	67,02	0,06	-4,57	-0,16	-0,09
LC	54,74	-0,06	-4,8	<b>0,17</b>	0,11	53,44	-0,02	<b>-7,46</b>	<b>0,17</b>	<b>0,14</b>
LF	80,53	-0,12	6,13	-0,04	-0,16	77,67	-0,03	0,32	-0,04	-0,08
PO	74,95	-0,12	5,28	0,07	-0,05	72,19	-0,04	-0,32	0,07	0,03
PU	84,61	<b>-0,34</b>	15,01	0,13	-0,21	81,51	<b>-0,26</b>	<b>8,72</b>	0,13	<b>-0,13</b>
<b>MP<sub>2,5</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>										
LC	27,13	-0,03	0,81	-0,06	<b>-0,10</b>	26,39	-0,01	-0,69	<b>-0,06</b>	<b>-0,08</b>
LF	35,50	-0,04	3,67	-0,17	<b>-0,20</b>	34,32	-0,003	1,29	<b>-0,17</b>	<b>-0,17</b>
PO	37,76	-0,07	2,62	-0,11	<b>-0,18</b>	36,42	-0,03	-0,11	<b>-0,11</b>	<b>-0,14</b>
PU	46,06	<b>-0,28</b>	9,58	0,10	<b>-0,17</b>	44,67	<b>-0,24</b>	<b>6,75</b>	0,10	<b>-0,14</b>
<b>O<sub>3</sub> (ppb)</b>										
BO	14,77	-0,008	-0,25	0,002	-0,006	15,18	<b>-0,019</b>	0,58	0,002	-0,018
CE	17,46	-0,011	0,86	-0,005	-0,016	17,96	<b>-0,025</b>	<b>1,88</b>	-0,005	<b>-0,030</b>
CN	13,96	0,001	-0,33	0,010	0,011	15,03	<b>-0,026</b>	0,99	0,023	-0,003
IN	12,9	0,004	-0,65	-0,009	-0,005	13,38	-0,009	0,32	-0,009	<b>-0,019</b>
LC	20,56	-0,04	0,17	0,033	-0,007	21,11	<b>-0,056</b>	1,27	0,033	<b>-0,022</b>
LF	16,77	-0,02	1,70	-0,035	-0,055	17,24	<b>-0,033</b>	<b>2,64</b>	-0,035	<b>-0,068</b>
PO	17,58	-0,029	-0,04	0,018	-0,011	18,16	-0,045	1,14	0,018	<b>-0,028</b>
PU	16,19	-0,002	-0,38	-0,016	-0,018	16,72	-0,017	0,68	-0,016	<b>-0,033</b>
<b>CO (ppm)</b>										
BO	1,22	-0,005	0,122	0,003	-0,002	1,17	<b>-0,003</b>	0,008	<b>0,003</b>	-0,001
CE	1,00	-0,006	0,186	0,006	-0,0004	0,95	<b>-0,005</b>	0,088	<b>0,006</b>	0,0009
CN	2,81	<b>-0,036</b>	<b>0,863</b>	<b>0,031</b>	-0,005	2,71	<b>-0,034</b>	<b>0,734</b>	<b>0,031</b>	-0,003
IN	1,11	<b>-0,007</b>	0,111	0,008	0,001	1,06	<b>-0,006</b>	0,006	<b>0,008</b>	0,002
LC	0,79	<b>-0,004</b>	0,029	0,003	-0,0003	0,77	<b>-0,003</b>	-0,017	<b>0,003</b>	0,0003
LF	1,23	-0,004	0,133	-0,0001	-0,005	1,18	<b>-0,003</b>	0,021	-0,0001	<b>-0,003</b>
PO	1,11	-0,005	0,026	0,003	-0,001	1,05	-0,003	-0,093	0,003	0,0004
PU	1,08	-0,005	0,228	0,003	-0,002	1,02	<b>-0,003</b>	0,101	0,003	-0,0004

Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU); en negritas coeficientes significativos (p<0,05)

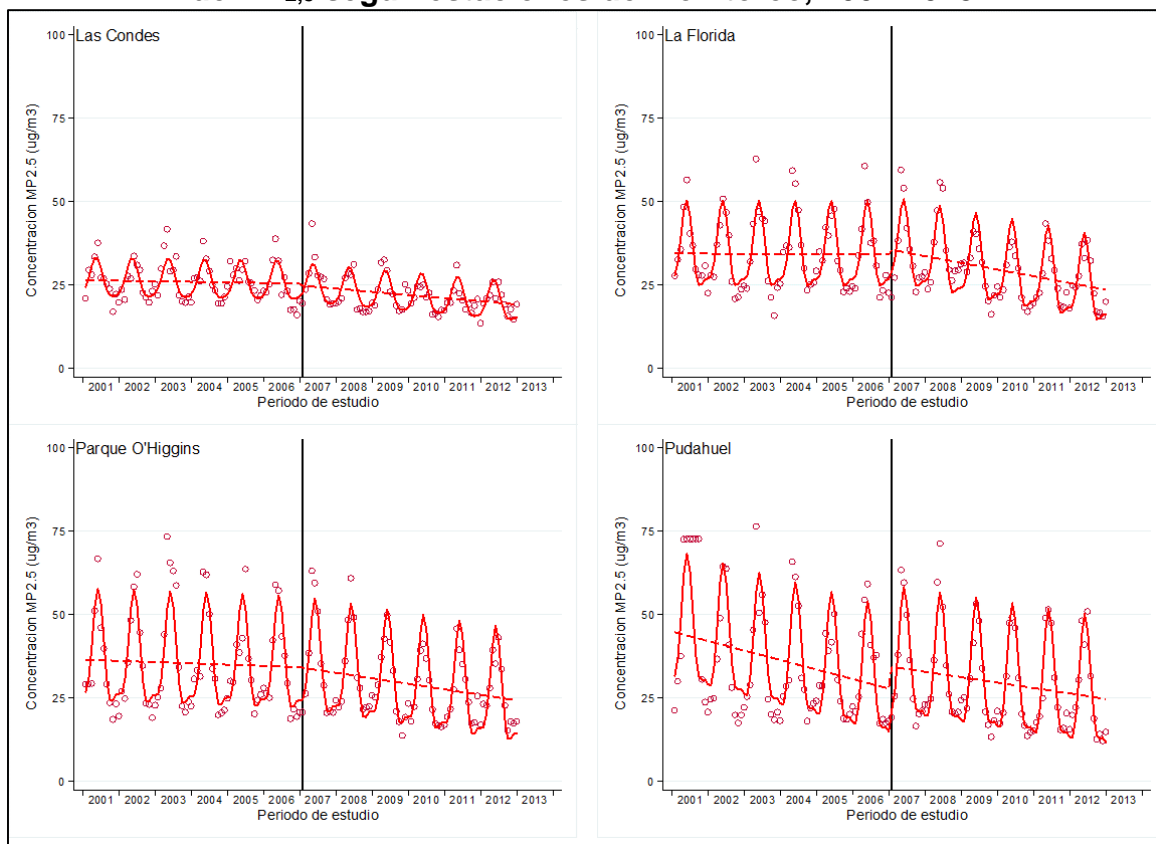


**Figura 21. Gráficos del modelo ajustado de STI para las medias mensuales de MP<sub>10</sub> según estaciones de monitoreo, 2001-2013.**



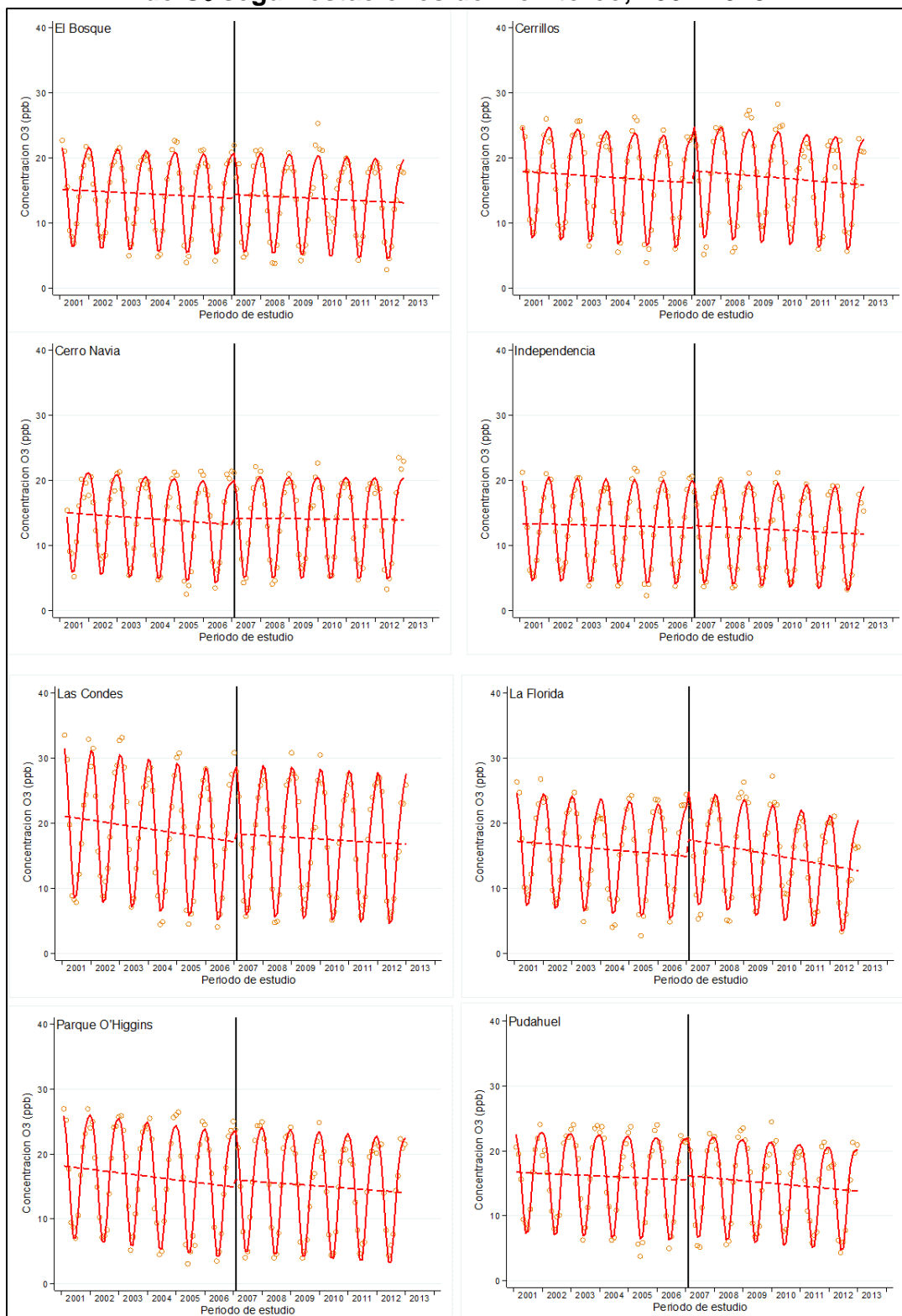
Línea vertical negra: introducción de TS

**Figura 22. Gráficos del modelo ajustado de STI para las medias mensuales de MP<sub>2,5</sub> según estaciones de monitoreo, 2001-2013.**



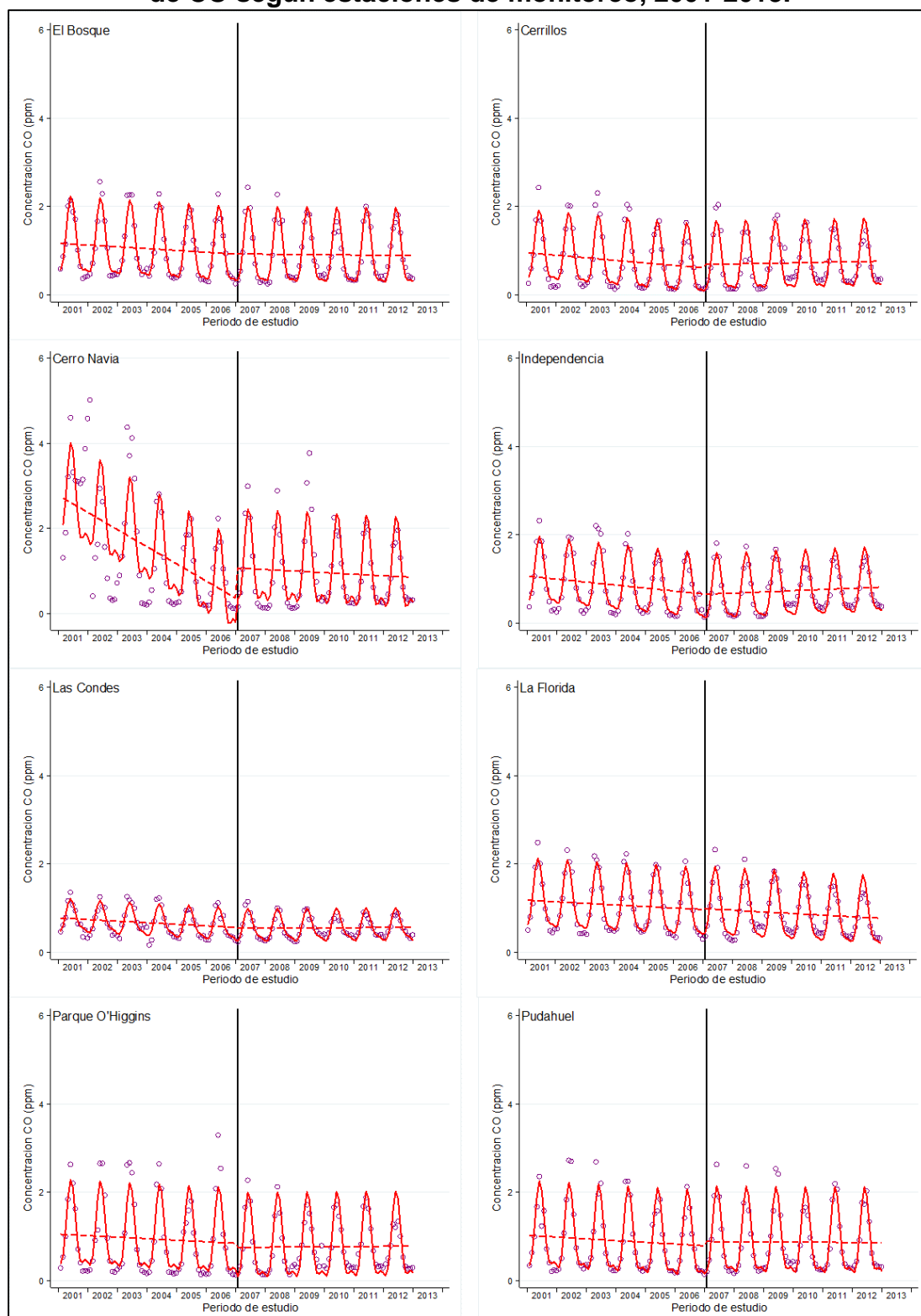
Línea vertical negra: introducción de TS

**Figura 23. Gráficos del modelo ajustado de STI para las medias mensuales de O<sub>3</sub> según estaciones de monitoreo, 2001-2013.**



Línea vertical negra: introducción de TS

**Figura 24. Gráficos del modelo ajustado de STI para las medias mensuales de CO según estaciones de monitoreo, 2001-2013.**



Línea vertical negra: introducción de TS

Finalmente, en base al análisis realizado para cumplir con el OE 2 se puede concluir lo siguiente:

1. En el análisis descriptivo de las concentraciones medias y máximos mensuales se observó que, en general, hubo una disminución de las concentraciones de todos los contaminantes posterior a la intervención (mayor disminución en los valores máximos mensuales). Sin embargo, se puede observar que las concentraciones previas y posteriores a la intervención son diferentes entre estaciones de monitoreo.
2. Consistentemente la estación LC mostró los menores valores en las concentraciones previas y posteriores a la intervención, y los mayores valores de concentraciones de contaminantes usualmente se observaron en las estaciones CN, LF, PO y PU.
3. Las variables climáticas mostraron poca variabilidad entre estaciones de monitoreo. Por otro lado, no se observaron grandes diferencias entre el período pre y post intervención dentro de cada estación de monitoreo.
4. Los resultados del modelo de STI mostraron:
  - Una tendencia previa a la intervención hacia la reducción de las concentraciones mensuales para todos los contaminantes estudiados, con diferente magnitud entre estaciones de monitoreo.
  - Las concentraciones en el primer mes post intervención, mostraron resultados inconsistentes entre las estaciones de monitoreo, con cambios en el nivel hacia un aumento o disminución de las concentraciones de contaminantes.
  - La tendencia post intervención es el principal interés del OE 2. Para el  $MP_{10}$ , mostró valores positivos en algunas estaciones de monitoreo (CE, CN, LC, PO y PU), en el caso de los valores que fueron significativamente distintos de cero (CN y LC), representaría que la intervención aumentó las concentraciones de este contaminante. También se observaron

valores negativos en las estaciones BO, IN y LF lo que significaría que en esos casos la intervención disminuyó la tendencia de las concentraciones. En el caso de  $MP_{2,5}$ , se observaron valores negativos en la tendencia post intervención lo que indicaría que ésta redujo las concentraciones de este contaminante. Para el  $O_3$ , no se observó ningún valor distinto de cero para la tendencia post intervención. En el caso del CO, la tendencia post intervención mostró valores positivos (significativos para 4 estaciones), que indicaría que la intervención aumentó las concentraciones de este contaminante.

- La tendencia combinada, considerando la tendencia pre y post intervención, en general mostró que, pese a que en algunos casos la introducción de la intervención aumentó la tendencia, la reducción en la tendencia previa ayudó a que la tendencia final tuviera valores negativos, es decir, una tendencia final hacia la reducción de concentraciones.
5. En general, el impacto del TS fue el esperado para las concentraciones de  $MP_{2,5}$  con una tendencia a la reducción, mientras que en el caso de las concentraciones de CO el impacto mostró una tendencia al aumento post intervención.
  6. La tendencia posterior a la intervención mostró diferentes valores entre estaciones de monitoreo, éste será el principal indicador utilizado para estudiar si el impacto se distribuyó de manera diferencial según variables socioeconómicas entre las estaciones de monitoreo.

#### **9.4. OE 3. Comparar los indicadores de calidad del aire y el impacto de TS entre zonas de Santiago, Chile según factores de estratificación social.**

##### ***Descripción del contexto social de las comunas donde están ubicadas las estaciones de monitoreo***

La Tabla 20 muestra los indicadores y variables de contexto social según comuna de ubicación de cada estación de monitoreo, esta tabla se ha ordenado según el Índice de Prioridad Social (IPS) de las comunas evaluado en el año 2007. Se puede observar que el valor del IPS varió entre los años 2007 y 2014, no obstante, el orden de las comunas según su prioridad solo se modificó para CE y PU, y la categorización no varió para ninguna comuna. La comuna con mayor prioridad social fue CN, seguida de BO, IN, CE y PU con prioridad media-alta. Las comunas LF y PO tienen una categoría de prioridad media-baja y LC se ubicó en la categoría sin prioridad.

En general, LF y LC fueron las comunas con mayor población total, mientras que la mayor densidad poblacional proyectada para el año 2010 la tiene la comuna de CN (122,3 hab./Ha); todas las comunas tienen un alto porcentaje de población urbana (>98%). Los mayores porcentajes de hacinamiento se observaron en IN y CN (18,3% y 17,7%, respectivamente), mientras que el menor porcentaje lo tuvo LC (1,5%).

En relación con los indicadores socioeconómicos, tanto en 2006 como en 2011, el mayor porcentaje de hogares en situación de pobreza lo tuvo CN (17,5% y 19,8%), mientras que LC tuvo el menor porcentaje (2,3%) y fue la única que mantuvo sus valores entre estos 2 años, a diferencia del resto de las comunas que aumentaron los porcentajes de hogares en situación de pobreza. El ingreso per cápita mensual en el año 2006 muestra que la comuna de LC tuvo el mayor ingreso (\$2047 miles de pesos mensuales  $\approx$  US\$2540 mensual), siendo más del doble del percibido en las comunas cuya categoría de prioridad social es "Media baja" (LF y PO), el triple o el cuádruple del percibido en las comunas con prioridad social "Media-alta" (IN, CE, PU, BO), y el quíntuple del percibido por la comuna con prioridad social "Alta"

(CN). Al comparar los ingresos anteriores con los del año 2013, la mayoría de las comunas aumentaron el ingreso per cápita mensual (excepto IN). Se puede observar que hubo una reducción de la brecha entre las comunas de categoría de prioridad social “Media-baja” (LF y PO) en relación con la comuna “Sin prioridad” (LC), no obstante, la brecha se mantuvo para el resto de las comunas.

Las variables de educación se mostraron análogas a las variables socioeconómicas, donde los menores años de estudio promedio los tuvo la comuna de CN ( $\approx 9$  años), así como los menores porcentajes de población con títulos técnico y universitario (3,5 y 2,8, respectivamente). Las únicas comunas con años de estudio promedio mayor a 12 años (que corresponde a enseñanza secundaria terminada) fueron PO y LC, concordante con los mayores porcentajes de población con estudios técnicos y universitarios.

Con respecto a los indicadores de salud, la comuna de IN (categoría de prioridad social “Media-alta”) muestra las mayores tasas de Años de Vida Potenciales Perdidos (AVPP) total, tanto en el año 2005 como 2010 ( $>140$  AVPP por 1000 hab.) y la mayor mortalidad infantil de 13,8 por 1000 nacidos vivos. Por el contrario, la comuna de LC muestra los menores valores para estos indicadores.



**Tabla 20. Descripción de los indicadores y variables de contexto social según comuna de ubicación de la estación de monitoreo.**

	CN	BO	IN	CE	PU	LF	PO	LC	Año
Categoría de prioridad social	<b>Alta</b>	<b>Media-alta</b>	<b>Media-alta</b>	<b>Media-alta</b>	<b>Media-alta</b>	<b>Media-baja</b>	<b>Media-baja</b>	<b>Sin prioridad</b>	2007-2014
Índice de prioridad social (Puntaje)	<b>74</b>	65	56	52	46	42	40	<b>8</b>	2007
Índice de prioridad social (Puntaje)	<b>69</b>	62	58	56	58	48	48	<b>11</b>	2014
<b>VARIABLES DEMOGRÁFICAS</b>									
Proyección de población	155372	186678	73121	77925	213469	381946	258186	267873	2007
Índice de masculinidad	0,98	0,98	0,89	0,96	0,98	0,94	0,99	0,81	2007
Población urbana (%)	100	100	100	100	98,3	99,8	100	100	2002
Densidad población (hab./Ha)	<b>122,3</b>	120,4	70,9	31,8	<b>13,3</b>	56,3	74,8	28,8	2002
Población < 14 años (%)	12,3	11,8	8,7	11,1	<b>13,1</b>	11,0	<b>7,1</b>	8,7	2007
Población > 65 años (%)	7,3	7,6	<b>14,9</b>	8,7	<b>5,1</b>	6,5	12,4	11,6	2007
Hacinamiento (%)	17,8	13,5	<b>18,3</b>	8,6	11,2	11,5	13,1	<b>1,6</b>	2013
Pob. perteneciente grupo étnico (%)	<b>6,6</b>	3,6	1,8	3,2	4,5	3,2	2,7	<b>1,3</b>	2002
<b>VARIABLES SOCIOECONÓMICAS</b>									
Hogares (N° total)	38719	45155	19072	19521	50158	9898	71481	74599	2002
Hogares en situación de pobreza (%)	<b>17,5</b>	15,8	6,1	8,3	7,1	9,6	7,3	<b>2,3</b>	2006
Hogares en situación de pobreza (%)	<b>19,8</b>	16,0	13,7	15,1	17,3	12,1	12,3	<b>2,3</b>	2011
Ingreso per cápita mensual (miles \$)	<b>416</b>	470	615	672	598	903	866	<b>2047</b>	2006
Ingreso per cápita mensual (miles \$)	531	644	<b>502</b>	717	682	1013	1279	<b>2275</b>	2013
<b>VARIABLES DE EDUCACION</b>									
Años estudio total (promedio)	<b>8,8</b>	9,5	10,6	9,9	9,6	10,9	11,9	<b>13,4</b>	2002
Años estudio total (promedio)	<b>9,9</b>	10,1	10,8	10,7	10,9	11,9	13,9	<b>14,8</b>	2013
Pob. con título técnico (%)	<b>3,5</b>	5,6	9,4	6,6	5,5	9,1	<b>10,8</b>	9,1	2002
Pob. con título universitario (%)	<b>2,8</b>	5,4	11,8	7,4	4,5	12,8	22,1	<b>39,2</b>	2002
<b>VARIABLES DE SALUD</b>									
AVPP total (por 1000 hab.)	91,0	78,6	<b>141,9</b>	81,4	63,6	58,8	92,4	<b>46,4</b>	2005
AVPP total (por 1000 hab.)	93,4	86,4	<b>194,6</b>	83,5	56,5	60,9	107,2	<b>44,1</b>	2010
Tasa mortalidad <1 año (por 1000 NV)	7,5	9,1	<b>13,8</b>	4,8	5,1	6,9	5,8	<b>4,2</b>	2011

Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU)

La Tabla 21 muestra algunos indicadores ambientales según la comuna de ubicación de la estación de monitoreo, esta tabla se ha ordenado según el IPS 2007 de las comunas desde el puntaje de mayor a menor prioridad. Las áreas verdes con mantención municipal que tuvieron la menor superficie por habitante se observaron en las comunas de IN y BO, siendo además las únicas comunas que mostraron una disminución entre 2005 y 2010. Por otro lado, se observó un alto porcentaje de la población en la comuna de CN que usa el transporte público (83,5%), aunque en general se observó un considerable uso del transporte público en las comunas (>60%). La percepción de calles en mal estado fue mayor en la comuna de CE (81,7%) y la menor en LC (16,6%), en la mayoría de las comunas la percepción de calles en mal estado fue mayor que 50%. En general la satisfacción con la seguridad de la comuna fue baja (<30%), no obstante, las comunas de CN (IPS "Alta") y LC (IPS "Sin prioridad") tuvieron mayor satisfacción en este aspecto con

40,7% y 68,7%, respectivamente. La percepción de calles en mal estado y la satisfacción con la seguridad del barrio han sido relacionados con la elección de caminar hasta del transporte público (Clark and Scott 2016). Cabe destacar que la comuna de CN a pesar de ser la comuna con mayor puntaje en el IPS, no tiene los peores indicadores ambientales anteriormente descritos.

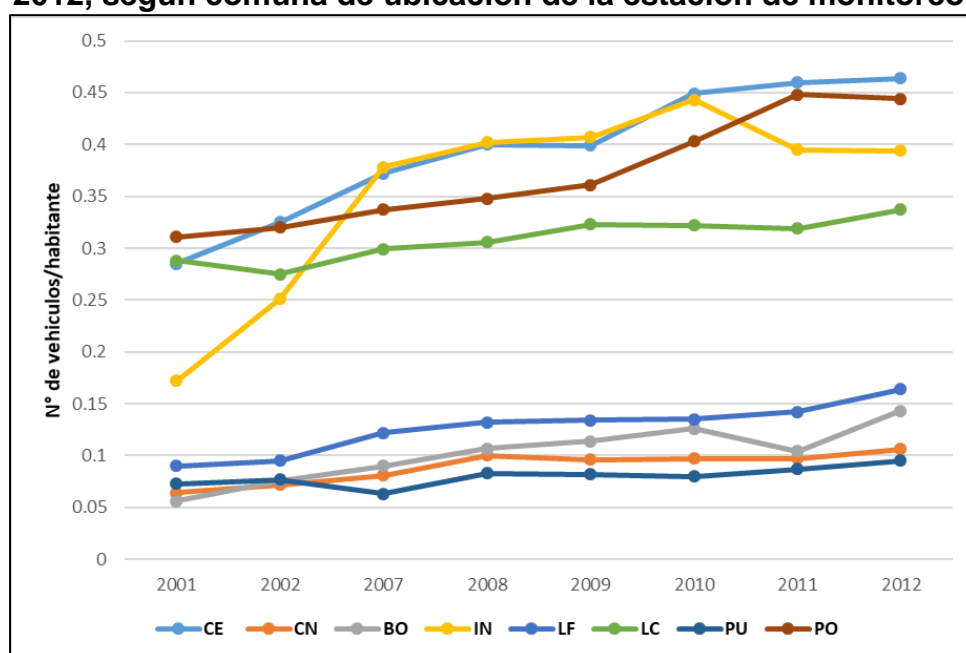
**Tabla 21. Descripción de algunos indicadores ambientales según comuna de ubicación de la estación de monitoreo.**

	CN	BO	IN	CE	PU	LF	PO	LC	Año
Categoría de prioridad social	<b>Alta</b>	<b>Media-alta</b>	<b>Media-alta</b>	<b>Media-alta</b>	<b>Media-alta</b>	<b>Media-baja</b>	<b>Media-baja</b>	<b>Sin prioridad</b>	2007-2014
Áreas verdes c/mantenición (m <sup>2</sup> /hab.)	2,7	2,1	<b>1,9</b>	5,7	3,1	2,7	<b>10,5</b>	5,5	2005
Áreas verdes c/mantenición (m <sup>2</sup> /hab.)	3,2	1,7	<b>1,3</b>	7,2	3,3	3,2	<b>12,1</b>	5,7	2010
Pob. usa transporte público (%)	<b>83,5</b>	65,2	67,5	70,5	74	75	60,2	<b>53,8</b>	2007
Percepción calles mal estado (%)	48,7	63,7	74	<b>81,7</b>	59,2	49,1	53	<b>16,6</b>	2007
Satisfacción seguridad comuna (%)	40,7	26,6	<b>26,3</b>	31,3	29,1	30,6	28,8	<b>68,7</b>	2007
Satisfacción comuna (%)	72,5	<b>57,5</b>	83	75,7	64	73,2	81,9	<b>89,7</b>	2007

Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU)

La Figura 25 muestra la serie de tiempo de la tasa de motorización (vehículo/habitante) entre los años 2002 y 2012 según las comunas estudiadas, cuyos valores se detallan en la Tabla A 15 (sección Anexos). Se puede observar que las comunas que presentan una mayor tasa de motorización en todo el período son CE, PO, IN, LC (>0,25 vehículo/habitante), mientras que las comunas de LF, BO, CN y PU presentaron las menores tasas (<0,15 vehículo/habitante). Esta tasa aumentó discretamente entre 2007 y 2008 en todas las comunas.

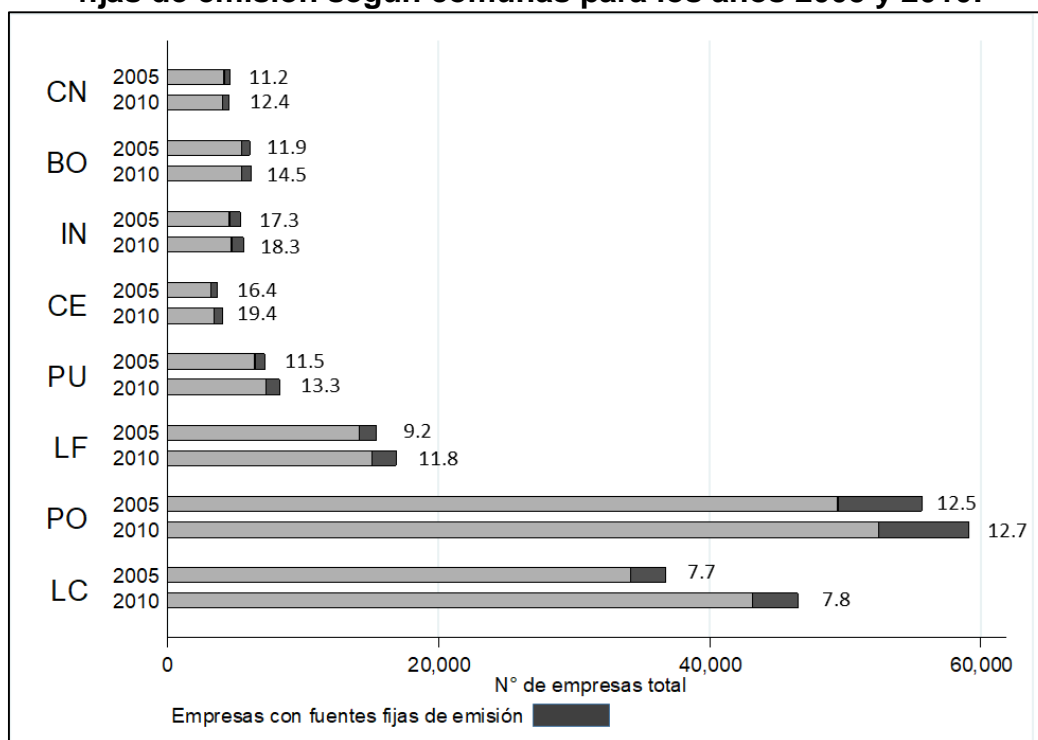
**Figura 25. Tasa de motorización (vehículos/habitante) entre los años 2002 y 2012, según comuna de ubicación de la estación de monitoreo.**



Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU)

La Figura 26 muestra el total de empresas y la proporción de empresas con fuentes fijas de emisión para los años 2005 y 2010 según las comunas estudiadas. Las comunas con mayor cantidad de empresas totales (>40 mil empresas) y con fuentes fijas de emisión (>2500 empresas) fueron PO y LC, con una variación mínima entre 2005 y 2010 ( $\approx 0,2\%$ ). Por otro lado, el resto de las comunas tienen menos de 20 mil empresas totales con una proporción de fuentes fijas inferior al 20%, no obstante, todas estas comunas registraron un aumento entre 2005 y 2010 mayor al 1%. Los valores absolutos, porcentajes y diferencia se detallan en la Tabla A 16 (sección Anexos).

**Figura 26. Número total de empresas y proporción de empresas con fuentes fijas de emisión según comunas para los años 2005 y 2010.**



Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU). Empresas con fuentes fijas de emisión incluye: a. Agricultura, ganadería y silvicultura; b. Explotación de minas y canteras; c. Industrias manufactureras metálicas y no metálicas

### ***Evaluación de las desigualdades en los indicadores de calidad del aire y los coeficientes del modelo STI entre estaciones de monitoreo***

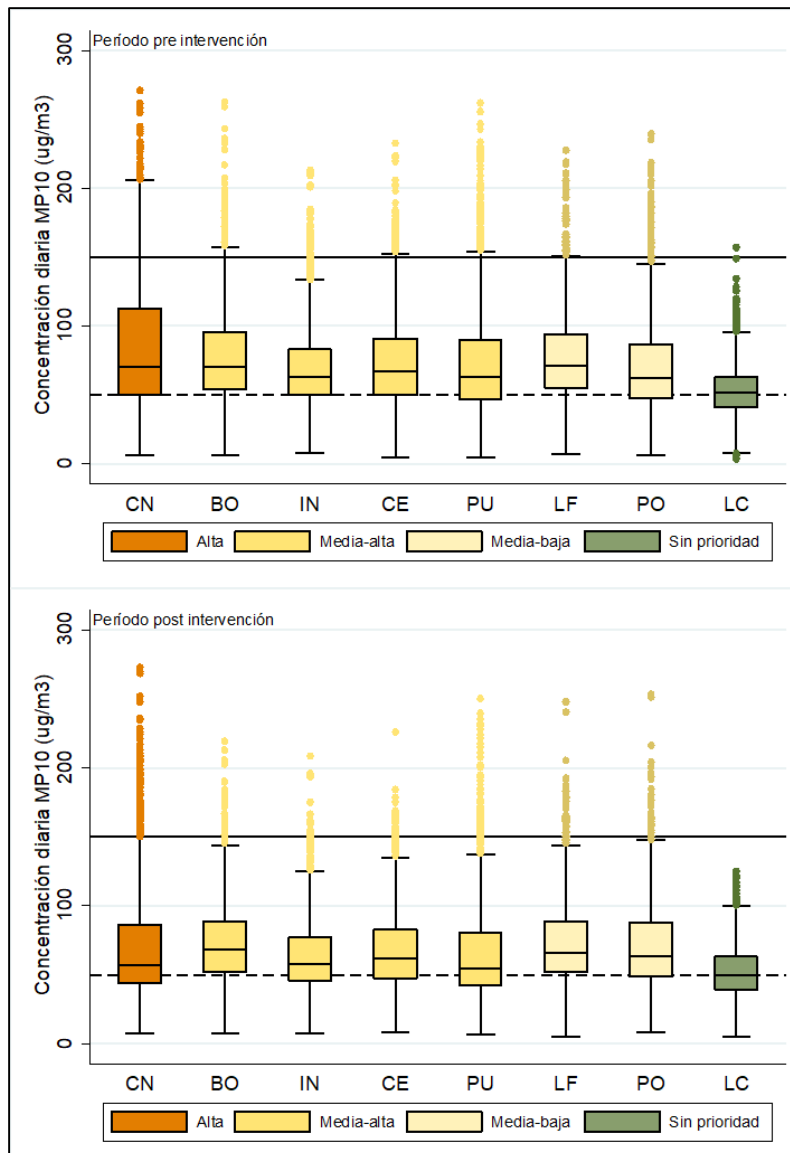
Los resultados del análisis para evaluar las desigualdades en los indicadores de calidad del aire pre y post intervención y los coeficientes obtenidos en el modelo STI, a través del Índice de Prioridad Social (IPS), se presentan a continuación según los indicadores detallados en el capítulo 7.

- i. **Concentraciones diarias:** la Figura 27 muestra los gráficos cajas de las concentraciones diarias de  $MP_{10}$  para las estaciones de monitoreo estudiadas ordenadas según su IPS, desde el mayor al menor puntaje durante el período previo y posterior a la implementación de TS. Los valores de las medianas y percentiles de las concentraciones según estaciones de monitoreo y período se

pueden revisar en la Tabla 14, capítulo 8. Los valores del test Kruskal-Wallis se detallan en la Tabla A 17 (sección Anexos).

Durante el período previo a la introducción de TS, las estaciones CN, BO y LF tuvieron las mayores medianas de concentración de  $MP_{10}$  ( $>70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), sin diferencias significativas entre estas 3 estaciones, no obstante, las mismas estaciones fueron significativamente distintas del resto de las estaciones que tuvieron menores valores en sus medianas de concentración. La estación LC tuvo una mediana de concentración significativamente menor que las otras estaciones de monitoreo ( $51,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Por otro lado, durante el período post intervención, en general todas las estaciones disminuyeron sus medianas de concentración; las medianas de concentración más altas las tuvieron las estaciones BO y LF ( $>65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), sin diferencias significativas entre ambas estaciones, pero si hubo diferencias significativas con el resto de las estaciones con menores valores en sus medianas de concentración. Nuevamente, la estación LC tuvo una mediana de concentración significativamente menor que el resto de las estaciones ( $50,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). En ambos gráficos de la Figura 27, no se observa un gradiente claro en las medianas de concentración de  $MP_{10}$  según IPS, solo se observan los mayores valores en las comunas con mayor IPS y el menor valor en la comuna con menor IPS.

**Figura 27. Concentraciones diarias de MP<sub>10</sub> pre y post intervención según el IPS comunal de las estaciones de monitoreo estudiadas.**



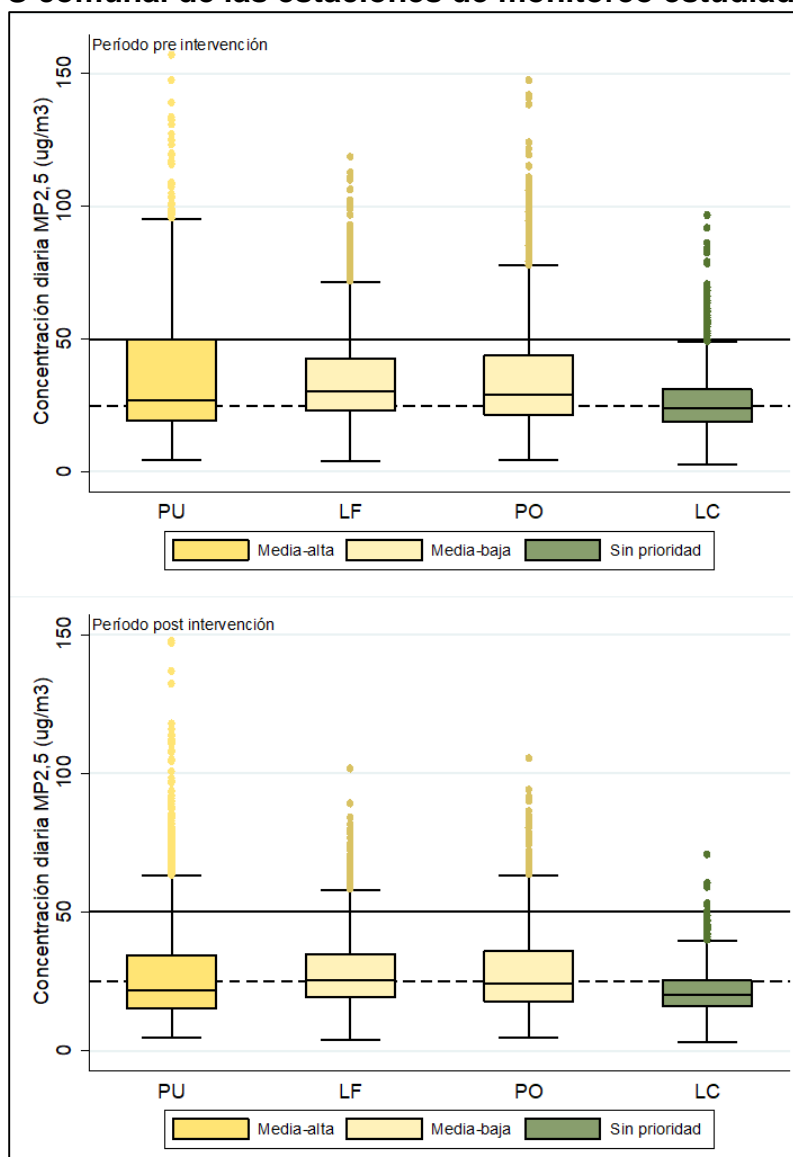
Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU). Línea negra continua: estándar diario chileno (MP<sub>10</sub>: 150 µg/m<sup>3</sup>); línea negra punteada: valor guía OMS (MP<sub>10</sub>: 50 µg/m<sup>3</sup>)

La Figura 28 muestra los gráficos de cajas de las concentraciones diarias de MP<sub>2,5</sub> para las estaciones de monitoreo ordenadas según su IPS, desde el mayor al menor puntaje durante el período previo y posterior a la implementación de TS. Los valores de las medianas y percentiles de las concentraciones según estaciones de monitoreo y período se pueden revisar en la Tabla 14, capítulo 8. Los valores del test Kruskal-Wallis se detallan en la Tabla

A 18 (sección Anexos), en la cual se puede corroborar que todas las medianas de concentración fueron significativamente diferentes.

En ambos períodos, las estaciones LF y PO tuvieron las mayores medianas de concentración de  $MP_{2,5}$  (pre intervención: 30,3 y 29,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y post intervención: 25,3 y 24,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente), ambas pertenecientes a la categoría de priorización social “Media-baja”. Las estaciones con las categorías de priorización social comunal de los extremos (“Media-alta” y “Sin prioridad”), mostraron las medianas más bajas en ambos períodos, aunque LC muestra ser la que tiene significativamente los valores de mediana de concentración más bajos (pre intervención: 24,0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y post intervención: 20,0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Por lo tanto, en los gráficos de la Figura 28 no es posible observar un gradiente en las medianas de concentración de  $MP_{2,5}$  según IPS.

**Figura 28. Concentraciones diarias de MP<sub>2,5</sub> pre y post intervención según el IPS comunal de las estaciones de monitoreo estudiadas.**



Estaciones: Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU). Línea negra continua: estándar anual chileno (MP<sub>2,5</sub>: 50 µg/m<sup>3</sup>); línea negra punteada: valor guía OMS (MP<sub>2,5</sub>: 25 µg/m<sup>3</sup>)

- ii. **Días de calidad del aire no saludable:** la distribución del número de días en que se supera el estándar chileno de MP<sub>10</sub> (150 µg/m<sup>3</sup>) y MP<sub>2,5</sub> (50 µg/m<sup>3</sup>) según estación de monitoreo y períodos previo y posterior a la introducción de TS, fueron presentados en la Tabla 16, del capítulo 8.

El índice de concentración (IC) para los días de calidad del aire no saludable para MP<sub>10</sub> fue de  $IC_{2001-2006} = -0,50$  para el período previo a la introducción del TS, mientras que para el período posterior a la introducción de TS fue de  $IC_{2008-}$

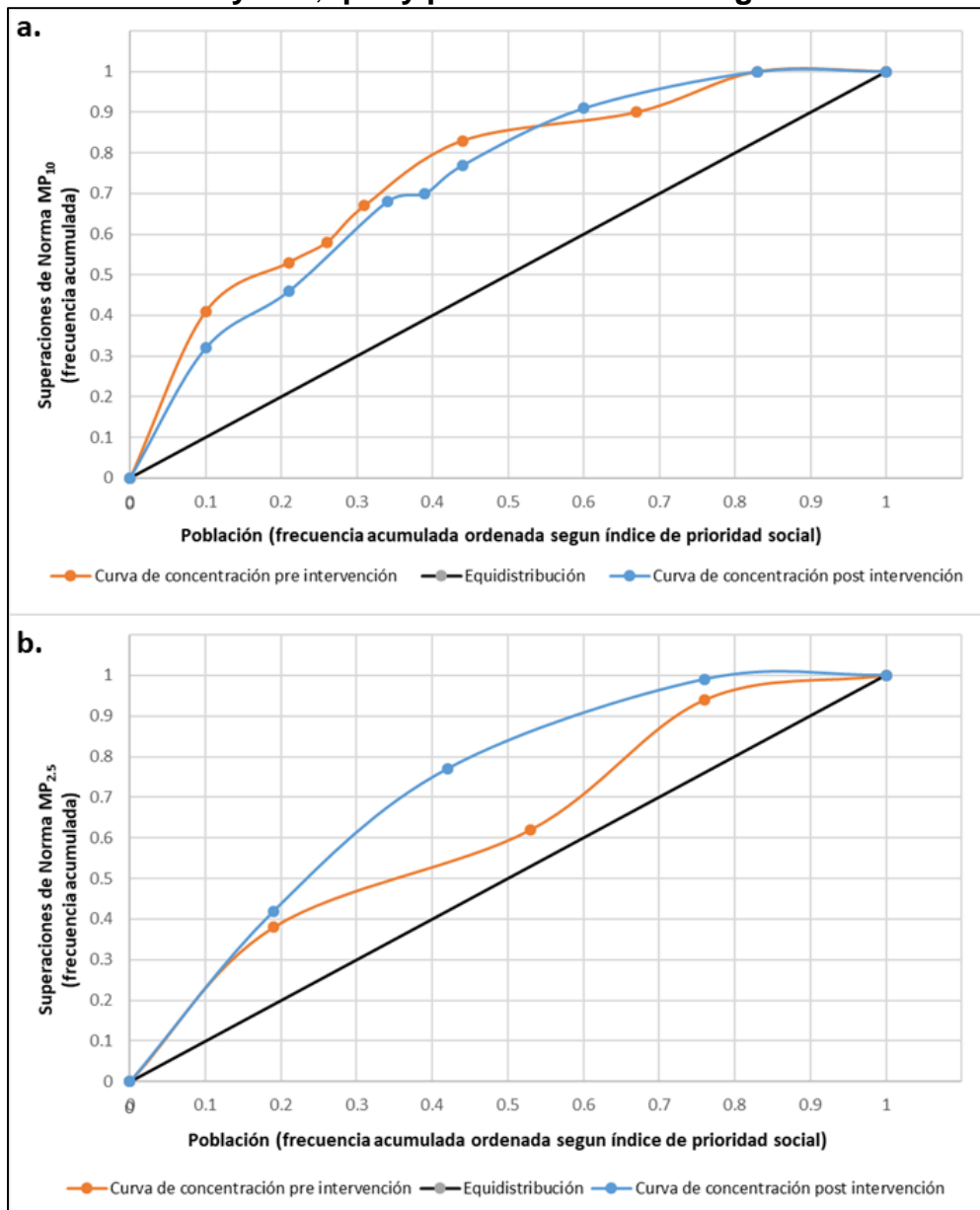


$2013 = -0,46$ , es decir, hubo una ligera reducción de la desigualdad en la distribución de los días de calidad del aire no saludable para este contaminante. Ambos valores se alejan del 0, lo que implica que existe desigualdad en la distribución de los días de calidad del aire no saludable en relación con el IPS comunal de las estaciones de monitoreo estudiadas. La Figura 29a, muestra la curva de concentración pre y post intervención para este indicador, en la cual se puede observar que la curva de concentración está por encima de la diagonal de equidistribución, lo que significa que las comunas con mayor IPS acumulan una cantidad de días de calidad del aire no saludable superior a la esperada. Específicamente, el segundo punto de izquierda a derecha marcado sobre la curva anaranjada (pre intervención) indica que el 41% de los días con calidad del aire no saludable para  $MP_{10}$  ocurrieron en el 10% de la población con mayor IPS; mientras que el segundo punto de derecha a izquierda marcado sobre la misma curva, muestra que el 17% de la población con menor IPS no presentó días con calidad del aire no saludable para  $MP_{10}$ . Ambas interpretaciones anteriores son para el período previo a la intervención, no obstante, este indicador tuvo un valor muy similar en el período posterior a la intervención.

Por otro lado, el IC para los días de calidad del aire no saludable para  $MP_{2,5}$  fue de  $IC_{2001-2006} = -0,24$  para el período previo a la introducción del TS, mientras que para el período posterior a la introducción de TS fue de  $IC_{2008-2013} = -0,43$ , es decir, hubo un aumento en la desigualdad de la distribución de los días de calidad del aire no saludable para este contaminante. La Figura 29b, muestra la curva de concentración pre y post intervención para este indicador, en la cual se puede observar que la curva de concentración está por encima de la diagonal de equidistribución, lo que significa que las comunas con mayor IPS acumulan una cantidad de días de calidad del aire no saludable superior a la esperada. Específicamente, el segundo punto de izquierda a derecha marcado sobre la curva anaranjada (pre intervención) indica que el 38% de los días con calidad del aire no saludable para  $MP_{2,5}$  ocurrieron en el 19% de la población con mayor IPS; mientras que el mismo punto sobre la curva azul (post intervención) indica que el 42% de los días con calidad del aire no saludable para  $MP_{2,5}$  ocurrieron

en el 19% de la población con mayor IPS, evidenciando el aumento de la desigualdad en la distribución de este indicador. Por otro lado, el segundo punto de derecha a izquierda marcado sobre la curva anaranjada (pre intervención), muestra que el 24% de la población con menor IPS presentó el 6% de los días con calidad del aire no saludable para  $MP_{2,5}$ , mientras que el mismo punto sobre la curva azul (post intervención) indica que el mismo porcentaje de la población presentó solo el 1% de los días con calidad del aire no saludable para este contaminante.

**Figura 29. Curvas de concentración de las superaciones del estándar diario de MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> pre y post intervención según el IPS.**



- iii. **Días de calidad del aire saludable:** la distribución del número de días en que no se supera el valor recomendado por la OMS para MP<sub>10</sub> (50 µg/m<sup>3</sup>) y MP<sub>2,5</sub> (25 µg/m<sup>3</sup>) según estación de monitoreo, se presenta en la Tabla 22. Se puede observar que en la mayoría de las estaciones de monitoreo aumentaron los días en que no se superaron los valores recomendados por la OMS en el período post intervención. Solo la estación PO mostró una disminución de los días de

calidad del aire saludable según recomendación OMS para el contaminante MP<sub>10</sub>, en el período post intervención.

**Tabla 22. Días de calidad del aire saludable para MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub>, en el período previo y posterior a la introducción de TS según estación de monitoreo.**

	Período 2001-2006 n=2191 n (%)	Período 2008-2013 n=2192 n (%)
<b>Días sin superación recomendación OMS: MP<sub>10</sub> (50 µg/m<sup>3</sup>)</b>		
BO	450 (20,5)	523 (23,9)
CE	601 (27,4)	720 (32,8)
CN	552 (25,2)	871 (39,7)
IN	618 (28,2)	804 (36,7)
LC	1057 (48,2)	1134 (51,7)
LF	412 (18,8)	509 (23,2)
PO	668 (30,5)	643 (29,3)
PU	712 (32,5)	953 (43,5)
<b>Días sin superación recomendación OMS: MP<sub>2,5</sub> (25 µg/m<sup>3</sup>)</b>		
LC	1293 (59,0)	1677 (76,5)
LF	798 (36,4)	1131 (51,6)
PO	909 (41,5)	1186 (54,1)
PU	1047 (47,8)	1326 (60,5)

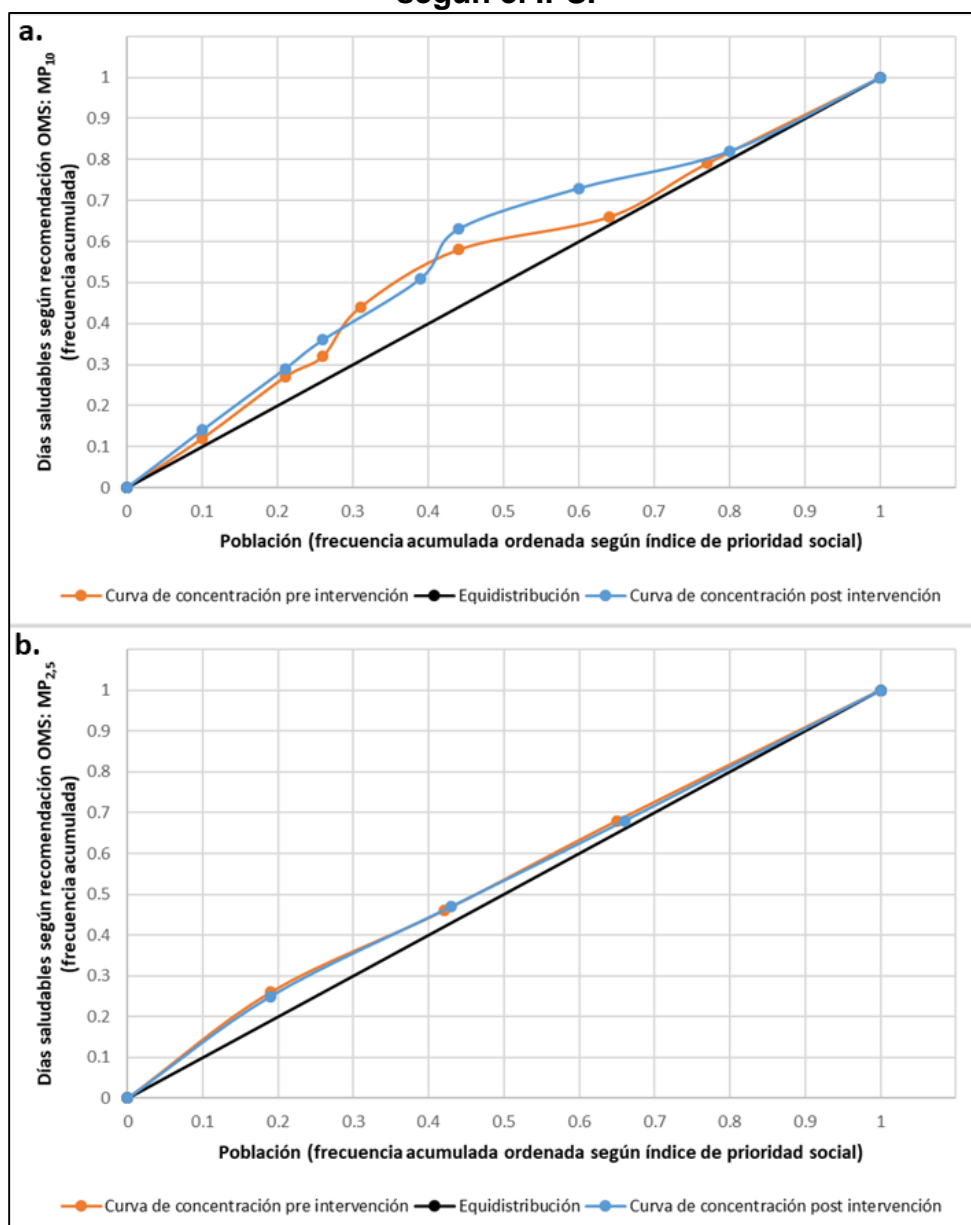
Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU)

El IC para los días de calidad del aire saludable para MP<sub>10</sub> fue de IC<sub>2001-2006</sub> = -0,06 para el período previo a la introducción del TS, mientras que para el período posterior fue de IC<sub>2008-2013</sub> = -0,14, es decir, hubo un ligero aumento de la desigualdad en la distribución de los días de calidad del aire saludable. De todas formas, ambos valores están cercanos a cero, lo que implica poca desigualdad en la distribución de los días de calidad del aire saludable en relación con el IPS comunal de las estaciones de monitoreo estudiadas. La Figura 30a, muestra la curva de concentración pre y post intervención para este indicador, en la cual se puede apreciar que ambas curvas están bastante cercanas a la curva de equidistribución. En su interpretación, el segundo punto de izquierda a derecha marcado sobre la curva anaranjada (pre intervención) indica que el 12% de los días con calidad del aire saludable para MP<sub>10</sub> ocurrieron en el 10% de la población con mayor IPS; mientras que el segundo punto de derecha a izquierda marcado sobre la misma curva, muestra que el 23% de los hogares con menor

IPS presentaron el 21% de los días con calidad del aire saludable para  $MP_{10}$ . Ambas interpretaciones anteriores son para el período previo a la intervención, no obstante, los valores fueron muy similares en el período posterior a la intervención.

Por otro lado, el IC para los días de calidad del aire saludable para  $MP_{2,5}$  fue de  $IC_{2001-2006} = -0,044$  para el período previo a la introducción del TS, mientras que para el período posterior a la introducción de TS fue de  $IC_{2008-2013} = -0,038$ , es decir, casi no hubo diferencias en la distribución de los días de calidad del aire saludable para este contaminante. La Figura 30b, muestra la curva de concentración pre y post intervención para este indicador, en la cual se puede apreciar que ambas curvas son muy similares y están cercanas a la curva de equidistribución. En su interpretación, el segundo punto de izquierda a derecha marcado sobre la curva anaranjada (pre intervención) indica que el 25% de los días con calidad del aire saludable para  $MP_{2,5}$  ocurrieron en el 19% de la población con mayor IPS; mientras que el segundo punto de derecha izquierda sobre la misma curva indica que el 34% de los hogares con menor IPS presentaron el 32% de los días con calidad del aire saludable para  $MP_{2,5}$ . Ambas interpretaciones anteriores son para el período previo a la intervención, no obstante, los valores fueron muy similares en el período posterior a la intervención.

**Figura 30. Curvas de concentración de los días de calidad del aire saludable según recomendación de la OMS para MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> pre y post intervención según el IPS.**

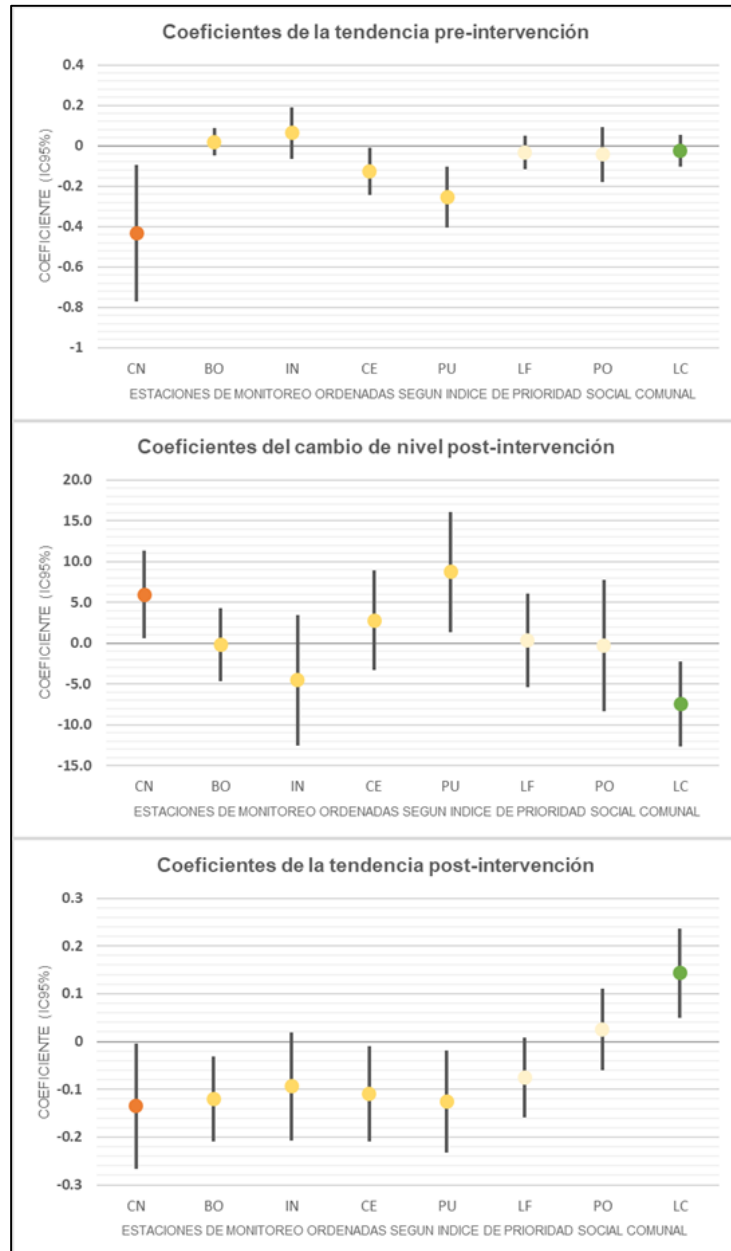


- iv. **Coefficientes del modelo STI:** la Figura 31 muestra una comparación descriptiva de los coeficientes del modelo STI según IPS de cada comuna para los resultados en el contaminante MP<sub>10</sub>. Se puede observar que los coeficientes de la tendencia de las concentraciones mensuales previos a la intervención mostraron una disminución significativa en las estaciones CN, CE y PU; el resto de las estaciones no mostraron tener una tendencia significativamente distinta

de cero. Se destaca que la comuna con mayor IPS, tuvo la mayor tendencia hacia la reducción de las concentraciones mensuales (B:  $-0,63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), no obstante, no es posible observar un gradiente entre los valores de la tendencia pre intervención y el IPS. Los coeficientes del cambio de nivel en el mes siguiente a la intervención mostraron un aumento significativo en la concentración de  $\text{MP}_{10}$  en CN y PU (ambas tenían una tendencia pre intervención hacia la disminución) y una disminución significativa en la estación LC (B:  $-7,46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Tampoco es posible observar un gradiente entre los valores del cambio de nivel post intervención y el IPS. Los coeficientes de la tendencia de las concentraciones mensuales posteriores a la intervención mostraron una disminución significativa en las estaciones CN, BO, CE y PU, todas pertenecientes a las categorías IPS con prioridad “Alta” y “Media-alta”; mientras que se observó un aumento significativo en la estación LC (“Sin prioridad”). Si bien, no es posible observar un gradiente entre los valores de la tendencia post intervención y el IPS, se puede observar que las estaciones con IPS comunales más altos mostraron tendencias post intervención hacia una disminución significativa de las concentraciones mensuales en el  $\text{MP}_{10}$ .

El IC para la tendencia post intervención de las concentraciones mensuales de  $\text{MP}_{10}$ , se calculó solo con las estaciones que mostraron una disminución en la tendencia, considerando el valor del estimador puntual del coeficiente (independiente de su significancia estadística), es decir, las estaciones CN, BO, IN, CE, PU y LF. El índice de concentración fue de  $\text{IC} = -0,25$ , este valor se aleja del cero, lo que implica que existe desigualdad en la distribución de la tendencia post intervención. La Figura 32, muestra la curva de concentración para este indicador.

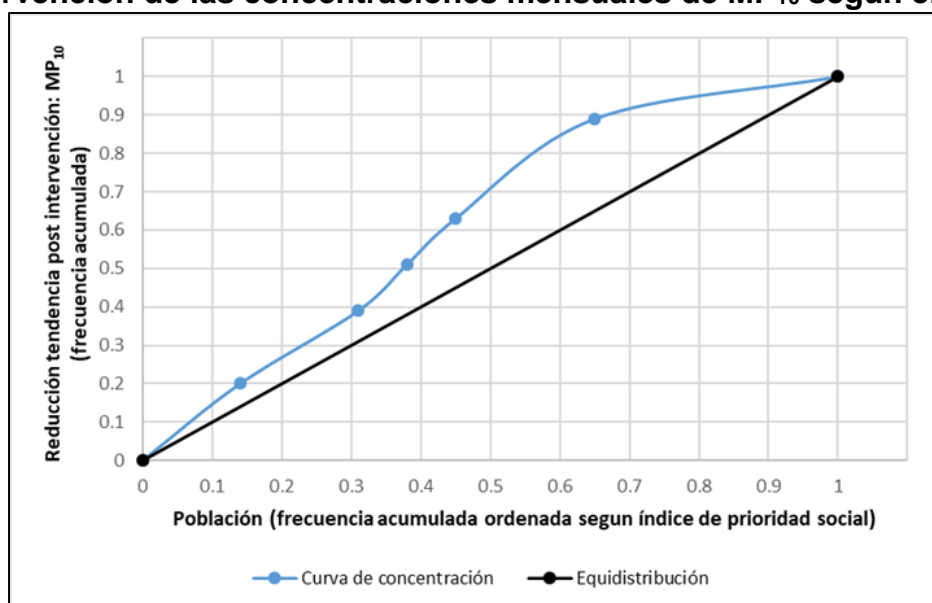
**Figura 31. Coeficientes estimados del modelo STI para las concentraciones de MP<sub>10</sub> según el IPS comunal de las estaciones de monitoreo estudiadas.**



Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU).



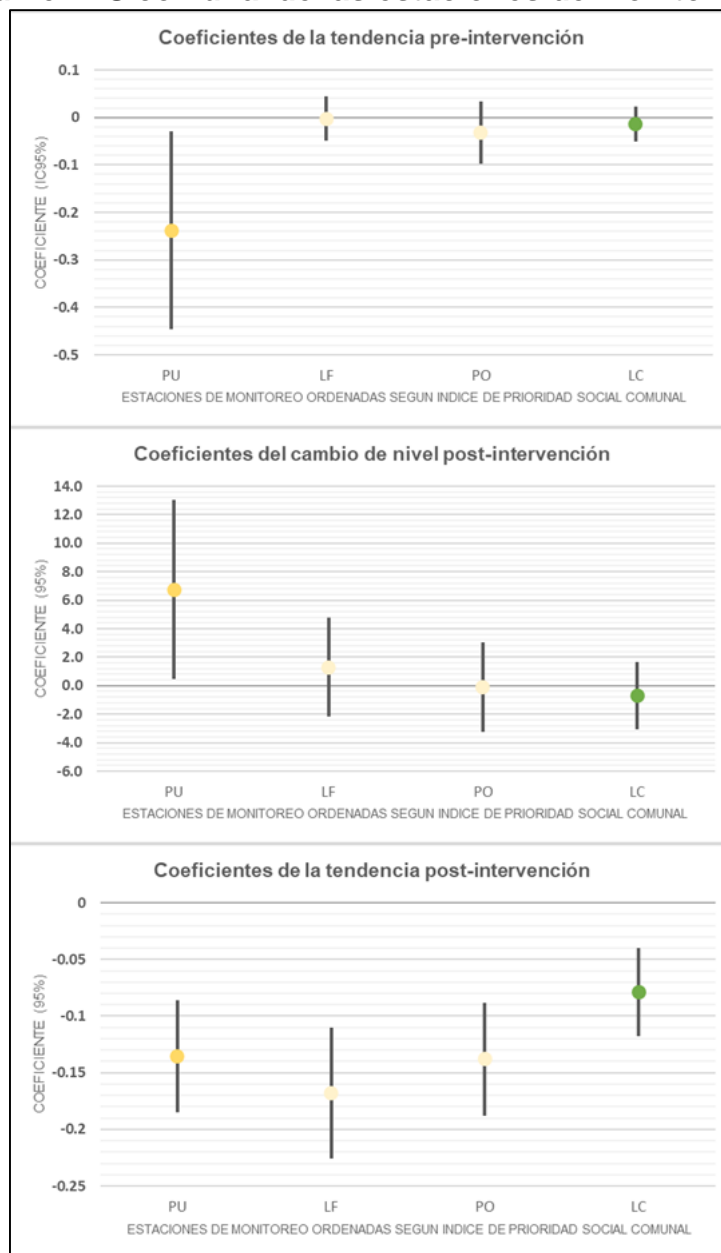
**Figura 32. Curva de concentración de la reducción en la tendencia post intervención de las concentraciones mensuales de MP<sub>10</sub> según el IPS.**



La Figura 33 muestra una comparación descriptiva de los coeficientes del modelo STI según IPS de cada comuna para los resultados en el contaminante MP<sub>2,5</sub>. Se puede observar que los coeficientes de la tendencia de las concentraciones previas a la intervención mostraron una disminución significativa solo en la estación PU; el resto de las estaciones no mostraron tener una tendencia significativamente distinta de cero. Se destaca que la comuna con mayor IPS, tuvo la mayor tendencia hacia la reducción de las concentraciones mensuales (-0,24 µg/m<sup>3</sup>), no obstante, no es posible observar un gradiente entre los valores de la tendencia pre intervención y el IPS. Los coeficientes del cambio de nivel posterior a la intervención mostraron un aumento significativo en la concentración mensual de MP<sub>2,5</sub> solo en la estación PU; en este caso tampoco fue posible observar un gradiente entre los valores del cambio de nivel post intervención y el IPS. Los coeficientes de la tendencia final de las concentraciones posteriores a la intervención mostraron una disminución significativa en las 4 estaciones: PU, LF, PO y LC. En este caso es posible observar un gradiente entre los valores de la tendencia y el IPS, en especial en las estaciones con menor IPS comunal.

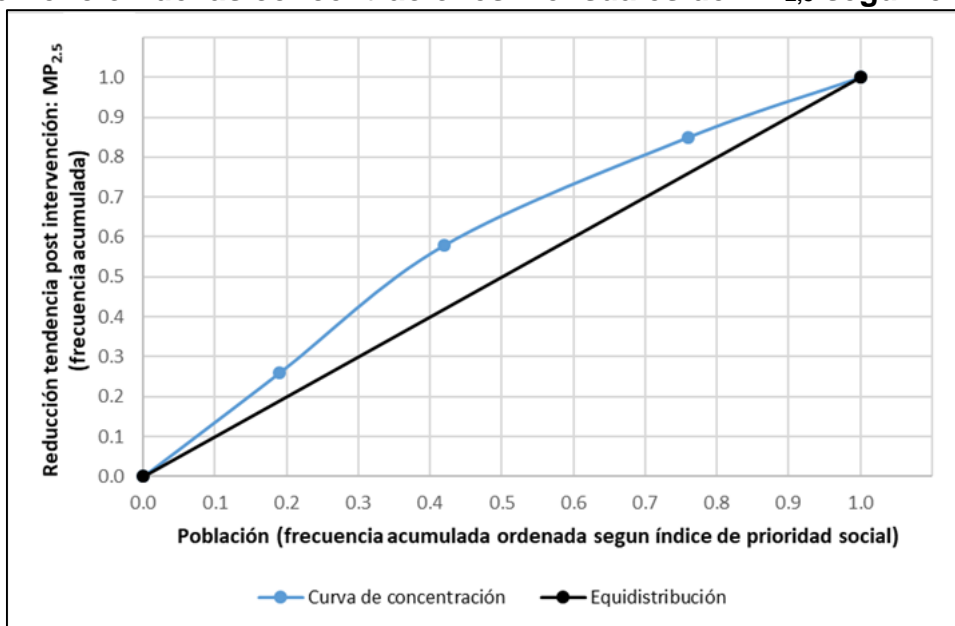
El IC para la tendencia final post intervención de las concentraciones de  $MP_{2,5}$ , tuvo un valor de  $IC = -0,17$ , el cual se aleja levemente del cero, lo que implica que existe poca desigualdad en la distribución de la tendencia post intervención. La Figura 34, muestra la curva de concentración para este indicador.

**Figura 33. Coeficientes estimados del modelo STI para las concentraciones de MP<sub>2,5</sub> según el IPS comunal de las estaciones de monitoreo estudiadas.**



Estaciones: Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU).

**Figura 34. Curva de concentración de la reducción en la tendencia post intervención de las concentraciones mensuales de MP<sub>2,5</sub> según el IPS.**



Finalmente, en base al análisis realizado para cumplir con el OE 3 se puede concluir lo siguiente:

1. En el análisis descriptivo del contexto social de las comunas donde se ubican las estaciones de monitoreo se pudo observar que hay una heterogeneidad en el contexto social, donde las 8 comunas mostraron un gradiente en sus puntajes del IPS, siendo categorizadas como de “Alta Prioridad”, “Media-alta”, “Media-baja” y “Sin prioridad”.
2. En general, los indicadores de contexto social considerados en este estudio, mostraron peores valores en las comunas con mayor IPS y mejores valores en las comunas con menor IPS.
3. Los indicadores ambientales considerados, mostraron los peores valores en las comunas con categorización “Media-alta” y no en la categoría de prioridad “Alta”, como se podría esperar. De todas formas, los mejores indicadores ambientales los tuvieron las comunas “Sin prioridad” y “Media-baja”, excepto para el uso del transporte público. Por otro lado, las comunas con menores tasas de motorización, concuerdan con las comunas que reportan un mayor uso del transporte público.
4. Los resultados de la evaluación de las desigualdades en los indicadores de calidad del aire pre y post intervención y los coeficientes obtenidos en el modelo STI, a través del Índice de Prioridad Social (IPS), mostraron:
  - **Concentraciones diarias:** durante el período previo a la introducción de TS, las mayores medianas de concentración de  $MP_{10}$  se observaron en las comunas con mayor ISP (categorías “Alta” y “Media-alta”), y la menor mediana de concentración se observó en la comuna con menor ISP. En el período post intervención, en general todas las estaciones disminuyeron sus medianas de concentración, cuyos valores fueron bastante similares entre las comunas, excepto para la comuna con menor IPS que tuvo una mediana de concentración significativamente menor que el resto de las estaciones. Si

bien, no se observó un gradiente claro en las medianas de concentración de  $MP_{10}$  según IPS, se obtuvieron los mayores valores en las comunas con mayor IPS y el menor valor en la comuna con menor IPS.

En el caso del contaminante  $MP_{2,5}$ , en ambos períodos, las estaciones con las categorías de priorización social comunal de los extremos (“Media-alta” y “Sin prioridad”), mostraron las medianas más bajas, y las comunas de la categoría intermedia (“Media-baja”) mostraron las medianas más altas, no obstante, la comuna categorizada como “Sin prioridad” tuvo los valores de concentración significativamente más bajos. Para este contaminante, tampoco fue posible observar un gradiente en las medianas de concentración de  $MP_{2,5}$  según IPS.

- **Días de calidad del aire no saludable:** Los IC para los días de calidad del aire no saludable por  $MP_{10}$ , tanto para el período previo ( $IC_{2001-2006} = -0,50$ ) como posterior ( $IC_{2008-2013} = -0,46$ ) a la introducción del TS indican que existió desigualdad en la distribución de los días de calidad del aire no saludable en relación con el IPS comunal de las estaciones de monitoreo estudiadas con una ligera reducción de la desigualdad en el período posterior a la intervención.

Los IC para los días de calidad del aire no saludable para  $MP_{2,5}$  indican que hubo un aumento de la desigualdad en la distribución de los días de calidad del aire no saludable para este contaminante entre el período previo ( $IC_{2001-2006} = -0,24$ ) y posterior ( $IC_{2008-2013} = -0,43$ ) a la introducción de TS.

- **Días de calidad del aire saludable:** en general, aumentaron los días en que no se superaron los valores recomendados por la OMS en el período post intervención. Los IC para los días de calidad del aire saludable para  $MP_{10}$ , tanto para el período previo ( $IC_{2001-2006} = -0,06$ ) como posterior ( $IC_{2008-2013} = -0,14$ ) a la introducción del TS indican que existe muy poca desigualdad en la distribución de los días de calidad del aire no saludable en relación con el IPS comunal de las estaciones de monitoreo estudiadas con un ligero aumento de la desigualdad en el período posterior a la intervención.

Los IC para los días de calidad del aire saludable para  $MP_{2,5}$  indican que prácticamente no hubo desigualdad en la distribución de los días de calidad

del aire no saludable para este contaminante entre el período previo ( $IC_{2001-2006} = -0,044$ ) y posterior ( $IC_{2008-2013} = -0,038$ ) a la introducción de TS.

- **Coeficientes del modelo STI:** la tendencia de las concentraciones mensuales de  $MP_{10}$  previa a la intervención mostró una disminución significativa en 3 estaciones, pertenecientes a las categorías de prioridad “Alta” y “Media-alta”. El cambio de nivel posterior a la intervención mostró un aumento significativo en la concentración mensual de  $MP_{10}$  en dos de las estaciones que tenían una disminución en la tendencia previa a la intervención. En los indicadores anteriores no fue posible observar algún gradiente relacionado con el IPS. La tendencia de las concentraciones mensuales de  $MP_{10}$  posteriores a la intervención mostraron una disminución significativa en todas las estaciones de las categorías IPS con prioridad “Alta” y “Media-alta”, y un aumento en la estación “Sin prioridad”; además, el IC para esta tendencia fue de  $IC = -0,25$ , que indica que existe desigualdad en los valores de la reducción de la tendencia post intervención.

La tendencia de las concentraciones mensuales de  $MP_{2,5}$  previa a la intervención mostraron una disminución solo en una estación (perteneciente a la categoría de prioridad “Media-alta”), mientras que el cambio de nivel posterior a la intervención mostró un aumento significativo en la misma estación. La tendencia final de las concentraciones mensuales de  $MP_{2,5}$  posteriores a la intervención mostraron una disminución significativa en todas las estaciones; el IC para esta tendencia fue de  $IC = -0,17$ , que indica que existe poca desigualdad en los valores de la reducción de la tendencia post intervención.

5. En síntesis, las concentraciones diarias de los contaminantes estudiados y los coeficientes del modelo STI mostraron una distribución heterogénea entre las comunas donde se ubican las estaciones de monitoreo sin mostrar un gradiente relacionado con su IPS y una distribución desigual marcada para los días con calidad del aire no saludable.

## 10. Discusión

### *Contribución y resultados principales*

La principal contribución de esta investigación es la evaluación del impacto de una intervención (implementación del TS) analizada según diferentes zonas geográficas, aplicando un enfoque de evaluación de desigualdades para diferentes indicadores de calidad del aire. Usualmente, tanto los reportes de evolución de la calidad del aire como la evaluación de intervenciones ambientales entregan cifras generales de las regiones o incluso de un país entero (Chan and Danzon 2005), sin detallar las posibles diferencias que se pueden observar en las zonas geográficas más pequeñas. Hasta la fecha, esta sería la primera investigación que evalúa el impacto de la implementación de la reforma al transporte público en la calidad del aire de las diferentes zonas geográficas de Santiago que cuentan con una estación de monitoreo, utilizando un análisis de Series Temporales Interrumpidas y considerando un enfoque de evaluación de desigualdades.

En síntesis, los principales resultados de este estudio son:

1. **Impacto de la introducción del TS en la calidad del aire:** tanto el análisis descriptivo como el de STI mostraron que el impacto de la introducción del TS en las concentraciones de los contaminantes estudiados, depende de cada contaminante y de cada estación de monitoreo. En el análisis descriptivo, las medianas de concentraciones diarias de  $MP_{10}$ ,  $MP_{2,5}$ , CO y  $O_3$  mostraron menores valores en sus concentraciones en el período posterior a la implementación de TS comparado con el período previo, en la mayoría de las estaciones de monitoreo. En general, la estación LC de manera consistente mostró las menores concentraciones pre y post intervención, mientras que las mayores concentraciones de contaminantes usualmente se observaron en las estaciones CN, LF, PO y PU.

Los valores normativos anuales para los contaminantes  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$  fueron superados por todas las estaciones de monitoreo en todo el período de estudio



(solo una estación mostró tener valores cercanos a la normativa anual). El número de superaciones de la normativa diaria posterior a TS disminuyó en todas las estaciones. De todas formas, en todo el período de estudio, las superaciones de las normativas de MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> (diaria y anual) fueron bastante frecuentes y heterogéneas entre las estaciones de monitoreo.

En relación a los resultados del análisis STI, en general, el impacto fue el esperado para las concentraciones de MP<sub>2,5</sub> con una tendencia final posterior a la intervención hacia la reducción en todas las estaciones estudiadas (0,08-0,17 µg/m<sup>3</sup> mensual), mientras que en el caso de las concentraciones de CO el impacto encontrado mostró una tendencia al aumento posterior a la intervención (0,003-0,031 ppm mensual). Con respecto al impacto en las concentraciones de MP<sub>10</sub>, en el 50% de las estaciones hubo una tendencia final a la reducción de las concentraciones mensuales, mientras que 2 estaciones mostraron una tendencia al aumento. La tendencia posterior a la implementación de TS para las concentraciones mensuales de O<sub>3</sub> mostraron una tendencia a la disminución en 6 estaciones de monitoreo (0,019-0,068 ppb mensual). Los valores de la tendencia posterior a la intervención mostraron diferente magnitud entre las estaciones de monitoreo para todos los contaminantes.

- 2. Comparación de los indicadores de calidad del aire y el impacto de TS según factores de estratificación social:** el contexto social de las comunas donde se ubican las estaciones de monitoreo fue heterogéneo, donde las 8 comunas mostraron diferentes puntajes del IPS, siendo categorizadas como de “Alta Prioridad”, “Media-alta”, “Media-baja” y “Sin prioridad”. Las concentraciones diarias de los contaminantes estudiados y los coeficientes del modelo STI mostraron una distribución heterogénea entre las comunas donde se ubican las estaciones de monitoreo sin mostrar un gradiente relacionado con su IPS. Se encontró una distribución desigual marcada para los días con calidad del aire no saludable por MP<sub>10</sub> (IC<sub>≈</sub> -0,50) en ambos períodos, y un aumento de la desigualdad en la distribución de los días con calidad del aire no saludable por MP<sub>2,5</sub> en el período posterior a la introducción de TS (IC<sub>2001-2006</sub>= -0,24 versus IC<sub>2008-2013</sub>= -0,43).

## ***Comparación de resultados con la literatura***

La mayoría de los estudios que han evaluado el impacto del TS en la calidad del aire se han enfocado en el MP<sub>10</sub>; Figueroa et al. (2013) encontraron una reducción en las concentraciones diarias de MP<sub>10</sub> de 3,9 µg/m<sup>3</sup> utilizando un modelo de efectos fijos por estación de monitoreo (7 estaciones de monitoreo) y día de la semana, utilizando las mediciones diarias correspondientes a los meses de abril-agosto (temporada fría) entre los años 1998 a 2010 (Figueroa et al. 2013), mientras que Bohme (2016) utilizando la misma metodología que Figueroa et al. (2013) pero en el período 2000-2015, encontró una reducción en las concentraciones diarias de MP<sub>10</sub> de 6,06 µg/m<sup>3</sup> atribuido a la introducción de TS (Bohme 2016). En este estudio se encontraron resultados similares, con una reducción de las concentraciones de MP<sub>10</sub> posterior a la introducción de TS, para 4 estaciones de monitoreo (BO, CE, CN y PU) con reducciones de 0,11 a 0,14 µg/m<sup>3</sup> mensual, no obstante, también se encontraron aumentos en la tendencia de las concentraciones posterior a TS en otras estaciones (LC, PO). El aumento en la tendencia de las concentraciones de MP<sub>10</sub> observado en la estación PO (0,03 µg/m<sup>3</sup> mensual) en este estudio, coincide con lo reportado por el Centro Mario Molina (2008) que comparó las concentraciones de MP<sub>10</sub> durante los meses de invierno de 2006 versus 2007 (aumentó un 45%), medidas en el centro de la ciudad de Santiago (cuya estación de monitoreo es PO), no obstante, el período de tiempo evaluado fue muy inferior al abarcado en este estudio (Centro Mario Molina 2008). Toro et al. (2014) encontraron una disminución de las concentraciones anuales de MP<sub>10</sub> antes de 2005 y un aumento entre 2007 a 2009, utilizando análisis de tendencias temporales entre 2000 y 2012 con datos de 4 estaciones de monitoreo (reportando resultados generales para las 4 estaciones) (Toro et al. 2014), mientras que en este estudio se observó una mantención de las concentraciones anuales durante ese período. El mismo autor reportó una disminución del porcentaje de días en que se supera el estándar diario chileno de MP<sub>10</sub> de manera concordante con los resultados de este estudio, y destaca que a pesar de la disminución se siguen superando los estándares.

Solo un estudio ha evaluado el impacto del TS en las concentraciones de  $MP_{2,5}$ , el estudio de Bohme (2016) descrito anteriormente, reportó un aumento de las concentraciones diarias de  $MP_{2,5}$  de al menos  $2,1 \mu g/m^3$  debido a la implementación de TS (Bohme 2016), lo cual es contrario a lo encontrado en este estudio en el que se encontró una tendencia a la reducción de las concentraciones mensuales en todas las estaciones de monitoreo estudiadas ( $0,08-0,17 \mu g/m^3$ ). Posiblemente la utilización de solo los meses invernales versus todos los meses del año influya en la disparidad de los resultados. Otros estudios no evaluaron el impacto de TS en las concentraciones de  $MP_{2,5}$ , no obstante, analizaron el período de tiempo previo y el posterior a TS. Barraza et al. (2017) reportaron una reducción de las concentraciones de  $MP_{2,5}$  entre 1998 y 2012, utilizando solamente las mediciones de la estación PO, lo cual concuerda con los resultados de este estudio tanto para la estación PO como para el resto de las estaciones de monitoreo estudiadas. El mismo autor investigó además la contribución de diferentes fuentes al  $MP_{2,5}$ , específicamente la fuente de vehículos motorizados aumentó su contribución en un 56% entre 2007 y 2008. No obstante, reportó una reducción de la contribución de un 32% comparando 2004-2005 versus 2010-2011 atribuyendo esta disminución a un posible efecto de largo plazo de la implementación de TS (Barraza et al. 2017). Por otro lado, Toro et al. (2014) encontraron una disminución de las concentraciones anuales de  $MP_{2,5}$  antes de 2005 y un aumento entre 2007-2009 (con datos de 4 estaciones de monitoreo), al igual que Jhun (2013) quien reportó un aumento de las concentraciones anuales de  $MP_{2,5}$  entre 2005-2008 (datos de estación PO) (Toro et al. 2014; Jhun et al. 2013). En este estudio se observó una mantención de las concentraciones anuales durante el mismo período reportado por ambos autores, no obstante, se observó una disminución de las concentraciones anuales de  $MP_{2,5}$  a partir de 2008 (aunque se mantienen valores por sobre la normativa anual). Toro et al. (2014) además reportó una disminución en el porcentaje de días en que se supera el estándar diario chileno de  $MP_{2,5}$  de manera concordante con los resultados de este estudio, y destaca que a pesar de la disminución se siguen superando los estándares (Toro et al. 2014).

Se encontraron 2 estudios que evaluaron el impacto del TS en las concentraciones de CO. El estudio de Bohme (2016), descrito anteriormente, utilizó las concentraciones diarias de CO (correspondiente al promedio de las concentraciones horarias registradas entre las 7-9 AM, como sustituto de flujo vehicular), quien no encontró ningún efecto de TS en las concentraciones de CO (Bohme 2016). Por el contrario, Gallego et al. (2013) reportó un aumento del 27% de las concentraciones diarias de CO después de 7 meses de implementación de TS (este autor también utilizó las concentraciones de CO como sustituto de flujo vehicular), asociándolo a un aumento de la cantidad de automóviles y mayor congestión vehicular, en el estudio utilizaron las mediciones de todos los meses del año de 7 estaciones de monitoreo durante el período 2005-2009 (Gallego, Montero, and Salas 2013). Los resultados de este estudio coinciden con lo reportado por Gallego et al. (2013), donde se encontró un aumento en la tendencia de las concentraciones mensuales de CO en 5 estaciones de monitoreo (0,003-0,031 ppm mensual).

No se encontraron estudios que hayan evaluado las concentraciones de O<sub>3</sub> previas y posteriores a la implementación de TS. De todas formas, la reducción de la tendencia de las concentraciones posterior a TS es concordante con los resultados encontrados para las tendencias en las concentraciones de MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub>.

Si bien resulta complejo comparar los resultados que incluyen todas las estaciones de monitoreo en su conjunto con los resultados específicos para cada estación de monitoreo, hubo varias consistencias con los hallazgos reportados por otros estudios. El hecho de incorporar un análisis para cada estación de monitoreo permitió identificar aquellas comunas en las que la introducción de TS pudo tener un efecto limitado, así como estudiar si los efectos de la intervención entre los grupos de distinto contexto social fueron teóricamente sólidos.

En relación a los resultados de la comparación de los indicadores de calidad del aire y el impacto de TS según factores de estratificación social, existen escasos estudios que han comparado las diferencias antes y después de una intervención y

que además haya realizado comparaciones según variables de estratificación social. Rose-Pérez (2015) evaluó las inequidades creadas por las diferencias espaciales en los niveles de contaminación por  $MP_{2,5}$  en Santiago, Chile, comparando los datos de calidad del aire con datos socioeconómicos utilizando los datos de 11 estaciones de monitoreo para el período 2008-2011. Los resultados mostraron que las concentraciones diarias más altas se registraron en PO, PU y CN (Rose-Pérez 2015), lo cual coincide con los resultados de este estudio en relación a las concentraciones promedio, aunque el período de estudio considerado para esta comparación es 2008-2013. Por otro lado, la misma autora reportó que LC tuvo los mejores indicadores de calidad del aire para  $MP_{2,5}$  (menos días de calidad del aire no saludable y más días con calidad del aire saludable) y los mejores indicadores de contexto social (bajo porcentaje de minorías, nivel de pobreza muy bajo, acceso adecuado a la atención primaria de salud y un índice de calidad de vida alto), mientras que PU y CN tuvieron los peores indicadores de calidad del aire (más días de calidad del aire no saludable y menos días con calidad del aire saludable) así como los peores indicadores de contexto social (mayor porcentaje de minorías, más pobreza y falta de acceso a la atención primaria de salud) (Rose-Pérez 2015). Estos resultados son concordantes con los encontrados en este estudio para el período 2008-2013, y apoyan las conclusiones de Rose-Pérez acerca de que, en Santiago, los municipios con la peor calidad del aire tienen niveles socioeconómicos más bajos que los municipios con mejor calidad del aire (Rose-Pérez 2015).

Otros estudios han evaluado la distribución espacial de las concentraciones de contaminantes o su composición en relación con variables socioeconómicas (Bell and Ebisu 2012; Brochu et al. 2011), los cuales han encontrado que existe una distribución desigual en la exposición a las concentraciones de distintos contaminantes encontrando un gradiente a través de las categorías de nivel socioeconómico. En este estudio, las concentraciones diarias de los contaminantes estudiados y los coeficientes del modelo STI mostraron una distribución heterogénea entre las comunas donde se ubican las estaciones de monitoreo, no obstante, no se observó un gradiente relacionado con su IPS, sino que las

categorías de los extremos mostraron mayor desigualdad en los resultados, la comuna con peor IPS mostró los peores valores en los indicadores de calidad del aire y la comuna con mejor IPS mostró los mejores valores en los indicadores de calidad del aire estudiados.

La distribución desigual encontrada en este estudio para los días con calidad del aire no saludable por  $MP_{10}$  ( $IC \approx -0,50$ ) en ambos períodos, y el aumento de la desigualdad en la distribución de los días con calidad del aire no saludable por  $MP_{2,5}$  en el período posterior a la introducción de TS ( $IC_{2001-2006} = -0,24$  versus  $IC_{2008-2013} = -0,43$ ), coinciden con lo reportado por Thomson et al. (2018) en una revisión sistemática que evaluó los efectos de diferentes intervenciones de salud pública sobre la equidad, identificando a las intervenciones ambientales como intervenciones que aumentaron las desigualdades. No obstante, solo incluyeron 3 estudios (Thomson et al. 2018).

En este estudio los IC para los días con calidad del aire saludable (previo y posterior a TS) y para los valores de la tendencia de las concentraciones mensuales posterior a la intervención mostraron valores cercanos a 0 indicando poca desigualdad ( $IC > -0,25$ ) y casi ninguna diferencia entre ambos períodos, resultados concordantes con lo reportado por Wang et al. (2016) quienes no encontraron resultados consistentes que indiquen que las estrategias orientadas a mejorar la calidad del aire reduzcan la inequidad en las exposiciones o eventos de salud relacionados con la contaminación del aire (Wang et al. 2016).

### ***Limitaciones y fortalezas***

Las limitaciones de este estudio se relacionan principalmente con las limitaciones clásicas de los estudios observacionales en que el investigador no manipula la intervención, en este caso la implementación del TS, debido a que se trata de la puesta en marcha de una reforma que se implementó en toda la ciudad y que afectó a todos sus territorios y habitantes, cuyo objetivo desde el punto de vista ambiental implicaba una implementación general, sin la opción de asignarla aleatoriamente.

De todas formas, el análisis de STI, permitió obtener resultados comparando la misma estación de monitoreo antes y después de la intervención.

Una limitación relevante podría ser el número de estaciones de monitoreo que disponían de mediciones suficientes en el período estudiado. De 13 estaciones de monitoreo, 8 tuvieron datos disponibles previos al año de la implementación del TS para los contaminantes MP<sub>10</sub>, O<sub>3</sub> y CO, mientras que solo 4 estaciones tuvieron datos disponibles MP<sub>2,5</sub> para este período. Esto no permite extrapolar los resultados a las comunas que no tienen una estación de monitoreo.

Como se trata de un estudio ecológico, los resultados no pueden ser extrapolados a nivel individual, aunque esto no ha sido pretensión de este estudio. Sin embargo, sería interesante analizar en investigaciones futuras, la variabilidad de la calidad del aire y variables de contexto social en los barrios de cada comuna.

Una limitación relacionada con el tipo de análisis, es que la STI permite determinar el cambio de la variable respuesta en la serie de tiempo antes y después de la intervención en un punto de tiempo dado, pero no demuestra claramente los determinantes causales del cambio. En este estudio no se identificó algún evento que ocurriera al mismo tiempo que la implementación de TS y que afectara las concentraciones de contaminantes del aire, no obstante, como se mencionó en el capítulo 3, la implementación ocurrió en un escenario complejo donde las condiciones de infraestructura y tecnología no estaban completamente disponibles sumado a una flota de autobuses reducida en un 30% que se hizo insuficiente para satisfacer la demanda, resultando en una experiencia negativa para los usuarios del transporte público. Lo descrito anteriormente, es muy relevante debido a que pudo influir en la conducta de los usuarios en relación con la selección del tipo de transporte a utilizar, esto se reflejó en una reducción del uso del transporte público (32% a 29%) y un aumento de la proporción del uso de vehículos privados (25% a 28%) posterior a la implementación de TS (Secretaría de Planificación del Transporte 2001, 2012); si bien esto no representó un evento que ocurrió al mismo tiempo que la implementación de TS, el cambio de conducta de los usuarios podría

afectar indirectamente los resultados de la intervención y los resultados de este estudio.

En relación a los indicadores de calidad del aire estudiados, estos corresponden a concentraciones de contaminantes en el tiempo como un sustituto de los niveles de exposición a los cuales están expuestas las personas en cada comuna de ubicación de la estación de monitoreo. De todas formas, las mediciones de las concentraciones de contaminantes provenientes de estaciones de monitoreo han sido utilizadas para asignar la exposición de las personas o comunas, tanto para estudiar la calidad del aire como los efectos en la salud de las personas (Gallardo et al. 2018; Barraza et al. 2017; Dales, Cakmak, and Blanco-Vidal 2010; Cakmak, Dales, and Blanco-Vidal 2007).

Los indicadores de contexto socioeconómico, estuvieron disponibles para algunos años del período estudiado, por esta razón, se incluyó un indicador para el período previo y uno para el posterior a la introducción de TS si estaban disponibles; aun así, los indicadores socioeconómicos de las comunas no varían considerablemente de un año para otro, sino que paulatinamente en el tiempo.

La evaluación de la desigualdad en la distribución del impacto de la introducción de TS se enfoca en las desigualdades socioeconómicas de la distribución de los indicadores de calidad del aire y de los resultados del análisis STI, y no en la distribución de estos indicadores en la población general.

Por otro lado, las fortalezas de este estudio, radican principalmente en la disponibilidad de los datos para realizar los análisis propuestos. El hecho de conocer la existencia de datos no validados, permitió cuantificarlos y tomar la decisión de no incluirlos, para posteriormente imputarlos. Como los datos fueron obtenidos desde fuentes oficiales de gobierno cuya información disponible es registrada a intervalos muy frecuentes, facilitó la descripción y el estudio de las tendencias y el control de la estacionalidad. Otra ventaja de haber utilizado esta fuente de datos, fue que la completitud de las bases en su menor unidad temporal



medida (hora) fue usualmente mayor al 90% y no se registró ningún cambio en los instrumentos ni en la forma de medición en el período estudiado.

Otra fortaleza fue que la serie de tiempo utilizada para el análisis de STI fue bastante extensa (72 meses previos y 72 meses posteriores a la implementación de TS), lo cual permitió identificar la presencia de efectos estacionales, tendencia, ciclo y si la intervención tuvo un efecto duradero en el resultado. Tal como describieron Zhang et al. (2011), los modelos de STI, cada vez más utilizados para estimar el impacto de las intervenciones, tienen una mayor potencia mientras mayor sea el número de puntos en el tiempo, especialmente si este número está equilibrado antes y después de la intervención (Zhang, Wagner, and Ross-Degnan 2011).

La metodología de análisis utilizada para evaluar el impacto de TS en las concentraciones de contaminantes, el análisis de STI, representó una forma novedosa de evaluar una intervención en el ámbito de la contaminación del aire, siendo descrita por López-Bernal et al. (2017) como una adecuada forma de evaluación del impacto longitudinal de una intervención (López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017), y que además entrega resultados con alto grado de validez interna (Linden 2015). Algunas amenazas a la validez de los resultados de los análisis de STI, se relacionan con el control de algunos aspectos importantes en una serie de tiempo, como la variabilidad de las mediciones que puede hacer más difícil detectar los efectos de una intervención (Biglan, Ary, and Wagenaar 2000; López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017); la autocorrelación que tiende a subestimar los errores estándar y llevar a conclusiones sesgadas sobre la importancia estadística de algunos coeficientes (Lagarde 2012; López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017; Biglan, Ary, and Wagenaar 2000); la estacionalidad que puede sesgar los resultados y los factores de confusión que varían en el tiempo (Biglan, Ary, and Wagenaar 2000; López-Bernal, Cummins, and Gasparrini 2017; Lagarde 2012). Todos estos aspectos fueron considerados en este estudio desde el punto de vista metodológico y mediante un análisis cuidadosamente planificado, con el objetivo de reducir las posibles amenazas a la validez y de esta forma que

los resultados del análisis STI entreguen evidencia valiosa sobre la efectividad de la intervención.

En este estudio el principal foco del análisis STI estuvo en la estimación de la tendencia de las concentraciones mensuales de los contaminantes posterior a la implementación de TS, y no en el cambio de nivel inmediatamente después de la implementación debido a que ésta se llevó a cabo en el mes de febrero (último mes de vacaciones de verano). La estimación de la tendencia posterior a la implementación, entrega una visión acerca de la sostenibilidad del efecto que es muy importante en la evaluación de una intervención.

### ***Reflexión sobre TS y su objetivo principal***

Como se detalló en el capítulo 3, el principal propósito del diseño del TS era aumentar la participación del transporte público en los viajes de la ciudad, lo cual consideraba generar una serie de beneficios al reducir la contaminación del aire, los niveles de ruido y los accidentes que involucran al transporte público.

La reducción de las concentraciones y de la tendencia de las concentraciones de  $MP_{2,5}$ ,  $MP_{10}$  y  $O_3$  posterior a la implementación de TS, encontradas en este estudio, apuntan a que la reducción de la contaminación del aire se logró en la mayoría de las comunas con estaciones de monitoreo, no obstante, esta reducción puede deberse principalmente a la reducción de la flota de autobuses y a la renovación de los autobuses antiguos por autobuses con estándar EURO III o superior, y no necesariamente al aumento de la participación del transporte público en los viajes de la ciudad. Lo anterior se sustenta en que los resultados de este estudio indican que hubo un aumento en la tendencia de las concentraciones de CO, al igual que lo reportado por Gallego et al (2013), quien atribuyó estos resultados a un aumento de los vehículos livianos debido a los problemas de implementación del TS y mayor congestión vehicular (Gallego, Montero, and Salas 2013). Además, esto es concordante con lo reportado por la SECTRA (2001-2012) quien reportó que los viajes en transporte público se redujeron y los viajes en vehículos privados

aumentaron, específicamente, los viajes al trabajo en TP disminuyeron de 53% a 41% y los viajes por estudio disminuyeron de 36% a 30% (Secretaría de Planificación del Transporte 2012, 2001). Este posible cambio de conducta a nivel individual en los usuarios del transporte pudo afectar los resultados de la implementación de TS, por lo tanto, las reducciones encontradas podrían haber sido de mayor magnitud si la implementación de TS se hubiese orientado a cumplir su propósito principal.

En las últimas décadas, los mayores recursos correspondientes al transporte en Santiago, Chile, han priorizado el uso del vehículo privado en desmedro del resto de los medios de transporte, lo cual podría tener efectos perjudiciales en la salud de los santiaguinos. En este sentido, tanto Santiago como otras ciudades de Chile, requieren una mayor responsabilidad por parte de las autoridades de transporte y medio ambiente por los impactos en salud y la sustentabilidad (emisiones de carbono) relacionados con los proyectos de transporte tanto a nivel local como regional.

En este estudio algunas comunas mantuvieron o aumentaron su tendencia posterior a TS en las concentraciones de contaminantes ( $MP_{10}$  y  $O_3$ ), esto sumado a las diferencias entre las comunas para las concentraciones de todos los contaminantes tanto en el período previo como posterior a TS; indica que algunas comunas necesitan reducciones adicionales para que la calidad del aire alcance niveles saludables. Las autoridades locales y los formuladores de políticas debieran considerar medidas locales para el control de los contaminantes en las comunas con concentraciones más altas, lo cual requiere de información adicional sobre fuentes locales fijas y móviles.

Más allá de la contribución puntual que pudo tener la implementación de TS en relación a la reducción de los niveles de contaminación del aire, objetivo principal de este estudio, la reforma al transporte público podría haber generado cambios importantes en la salud de la población considerando que el transporte es un importante determinante de la salud, no solo a través de la contaminación del aire,

sino que también a través de la actividad física, los niveles de ruido y las lesiones, entre otras (Shaw et al. 2018).

Reconociendo que la implementación de TS fue una intervención compleja, la principal enseñanza que debe ser transmitida a las autoridades, es que la planificación del transporte si bien está asociada con el desarrollo económico y social, también lo está con diferentes riesgos y beneficios para la salud según el modo de transporte que se utilice (Avila-Palencia et al. 2018). Por lo tanto, es imprescindible considerar profesionales de distintas disciplinas, incluyendo la salud pública, en la planificación de los cambios en el transporte público de la ciudad considerando y anticipando su efecto en la demanda de transporte privado.

En este sentido, la planificación del transporte está estrechamente vinculada a la planificación urbana, no obstante, en Chile se ejecutan en distintas entidades de gobierno: Ministerio de Transporte y Ministerio de Vivienda, respectivamente, y ambas planificaciones están muy relacionadas con externalidades positivas y negativas en el medio ambiente y la salud, ejecutadas por el Ministerio del Medio Ambiente y Ministerio de Salud. Por lo tanto, es primordial que a nivel de gobierno las decisiones de planificación relacionadas con el transporte público involucren al menos estos cuatro ministerios. La reforma al transporte público implementada el año 2007 fue diseñada sólo por el Ministerio de Transportes y SECTRA, sin embargo, actualmente se siguen haciendo modificaciones relacionadas con cambios centrados en enfoques tecnológicos y operativos en los que ha participado el Ministerio de Medio Ambiente.

Como la reforma al transporte público de Santiago sigue siendo modificada, es necesario que los planificadores del transporte conformen equipos multidisciplinarios que se enfoquen en cumplir su principal propósito: aumentar la participación del transporte público en los viajes de la ciudad. Desde el punto de vista de salud pública es muy importante aumentar la participación del transporte público y otras formas de transporte activo en los viajes de la ciudad de manera de mejorar la eficiencia dentro de los sistemas de transporte, aumentar los niveles de

actividad física de la población y reducir las externalidades negativas del uso de vehículos privados (Brown et al. 2019; Fleeman and Scott-Samuel 2000; Gorman et al. 2003), como la congestión vehicular, el uso de espacio físico, el ruido, la emisión de contaminantes del aire y de gases de efecto invernadero, entre otros (Avila-Palencia et al. 2018; Brown et al. 2019; Rojas-Rueda et al. 2013).

Finalmente, existen estudios que han investigado las causas de las dificultades de la implementación de TS (Muñoz, Ortúzar, and Gschwender 2009; Muñoz, Batarce, and Hidalgo 2014; Briones 2009) y del análisis en aspectos particulares comparando el período previo con el posterior a la implementación (tiempos de espera, número de personas en las paradas de autobuses, entre otros) (Gallardo et al. 2018; Ureta 2014; Gallego, Montero, and Salas 2013); no obstante, es necesario investigar las principales motivaciones y razones individuales que podrían ayudar a generar cambios en los modos de transporte desde los vehículos privados al transporte público y otras formas de transporte activo. Incluir estas motivaciones y razones individuales en la planificación y futuras modificaciones en el transporte público de Santiago, podría aumentar el atractivo de su uso y una mayor participación en los viajes de la ciudad. Una planificación saludable del transporte en la ciudad de Santiago, tendrá importantes beneficios no solo ambientales, sino que también individuales, sociales y económicos.

## 11. Conclusiones

1. La implementación de la reforma al transporte público tuvo un impacto en la calidad del aire de Santiago, Chile.
2. El impacto de la implementación del TS y su magnitud dependió de cada contaminante y de cada estación de monitoreo.
3. Las concentraciones diarias de MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub>, CO y O<sub>3</sub> mostraron una disminución en el período posterior a la implementación de TS comparado con el período previo, en la mayoría de las estaciones de monitoreo.
4. Las concentraciones mensuales de MP<sub>2,5</sub> mostraron una disminución en el período posterior a la implementación de TS comparado con el período previo, en todas las estaciones de monitoreo.
5. El impacto en la tendencia posterior a la implementación de TS fue el esperado para las concentraciones de MP<sub>2,5</sub> con una tendencia a la reducción en todas las estaciones de monitoreo estudiadas; mientras que, en el caso de las concentraciones de CO, en general, el impacto mostró una tendencia al aumento posterior a la intervención.
6. Hubo estaciones de monitoreo que no mostraron reducciones en la tendencia de las concentraciones de MP<sub>10</sub> y O<sub>3</sub> posterior a la implementación de TS, lo cual realza la necesidad de estudiar los factores que influyen en que estas comunas hayan tenido un efecto limitado de la intervención en su calidad del aire.
7. A pesar del impacto en la tendencia de los contaminantes posterior a la implementación de TS, los valores normativos anuales y diarios para los contaminantes MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> siguen superándose de manera frecuente y diferencial en todas las estaciones de monitoreo estudiadas, lo cual indica que

en Santiago las personas están expuestas a niveles de contaminación que los puede llevar a tener efectos en salud de corto y largo plazo.

8. Se encontraron desigualdades en la distribución de las concentraciones diarias de los contaminantes  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$  según variables de contexto social. Las comunas de Santiago que mostraron la peor calidad del aire tuvieron los IPS más altos, y las comunas con mejor calidad del aire tuvieron los IPS más bajos.
9. La distribución de los días con calidad del aire no saludable para  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$ , fue desigual, donde la mayor carga de días con aire no saludable la soporta la comuna con mayor IPS. De manera opuesta, la distribución de los días con calidad del aire saludable no mostró una distribución desigual.
10. La magnitud de la tendencia posterior a la intervención mostró una distribución heterogénea entre las comunas donde se ubican las estaciones de monitoreo, sin mostrar un gradiente relacionado con su IPS. No obstante, se observaron grandes diferencias entre las comunas de mayor y menor IPS.
11. La comparación de los indicadores de desigualdad estudiados entre el período previo y posterior a la implementación de TS permite concluir que la implementación de TS aumentó las desigualdades solo en la distribución de los días con calidad del aire no saludable para  $MP_{2,5}$ .

## 12. Referencias

- Ab Manan, Norfazillah, Azimatun Noor Aizuddin, and Rozita Hod. 2018. "Effect of Air Pollution and Hospital Admission: A Systematic Review." *Annals of Global Health* 84 (4): 670. <https://doi.org/10.29024/aogh.2376>.
- Agency Environmental Protection. n.d. "EPA, United States, Criteria Air Pollutants." Accessed July 25, 2018. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>.
- Aguirre, Armando. 1994. *Introducción Al Tratamiento de Series Temporales. Aplicación a Las Ciencias de La Salud*. Edited by Editorial Díaz de Santos. Madrid.
- Avila-Palencia, Ione, Luc Int Panis, Evi Dons, Mailin Gaupp-Berghausen, Elisabeth Raser, Thomas Götschi, Regine Gerike, et al. 2018. "The Effects of Transport Mode Use on Self-Perceived Health, Mental Health, and Social Contact Measures: A Cross-Sectional and Longitudinal Study." *Environment International* 120: 199–206. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.08.002>.
- Babatola, Samuel Soledayo. 2018. "Global Burden of Diseases Attributable to Air Pollution." *Journal of Public Health in Africa* 9 (3). <https://doi.org/10.4081/jphia.2018.813>.
- Bacallao, Jorge. 2007. "Indicadores Basados En La Noción de Entropía Para La Medición de Las Desigualdades Sociales En Salud." *Revista Cubana de Salud Pública* 33 (4).
- Barraza, Francisco, Fabrice Lambert, Héctor Jorquera, Ana María Villalobos, and Laura Gallardo. 2017. "Temporal Evolution of Main Ambient PM<sub>2.5</sub>sources in Santiago, Chile, from 1998 to 2012." *Atmospheric Chemistry and Physics* 17 (16): 10093–107. <https://doi.org/10.5194/acp-17-10093-2017>.
- Bell, Michelle L., and Keita Ebisu. 2012. "Environmental Inequality in Exposures to Airborne Particulate Matter Components in the United States." *Environmental Health Perspectives*, no. 120: 1699–1704. <https://doi.org/10.1289/ehp.1205201>.
- Benmarhnia, Tarik, Lynda Rey, Yuri Cartier, Christelle M. Clary, Séverine Deguen, and Astrid Brousselle. 2014. "Addressing Equity in Interventions to Reduce Air Pollution in Urban Areas: A Systematic Review." *International Journal of Public Health*. <https://doi.org/10.1007/s00038-014-0608-0>.
- Bhaskaran, Krishnan, Antonio Gasparrini, Shakoor Hajat, Liam Smeeth, and Ben Armstrong. 2013. "Time Series Regression Studies in Environmental Epidemiology." *International Journal of Epidemiology*, no. 42: 1187–1195. <https://doi.org/10.1093/ije/dyt092>.
- Biglan, Anthony, Dennis Ary, and Alexander C. Wagenaar. 2000. "The Value of Interrupted Time-Series Experiments for Community Intervention Research." *Prevention Science*



- 1 (1): 31–49. <https://doi.org/10.1023/A:1010024016308>.
- Bohme, Nicolas. 2016. “Estimación Del Impacto Del Transantiago En La Calidad Del Aire Mediante Un Procedimiento En Dos Etapas.” Universidad de Chile.
- Box, George E.P., Gwilym M. Jenkins, and Gregory C. Reinsel. 2016. *Time Series Analysis: Forecasting and Control: Fifth Edition*. Edited by John Wiley & Sons. *Time Series Analysis: Forecasting and Control: Fifth Edition*. Hoboken, New Jersey. <https://doi.org/10.1002/9781118619193>.
- Briones, Ignacio. 2009. “Transantiago: Un Problema de Información.” *Estudios Públicos* 116: 37–90.
- Brochu, Paul J., Jeff D. Yanosky, Christopher J. Paciorek, Joel Schwartz, Jarvis T. Chen, Robert F. Herrick, and Helen H. Suh. 2011. “Particulate Air Pollution and Socioeconomic Position in Rural and Urban Areas of the Northeastern United States.” *American Journal of Public Health* 101 (S1). <https://doi.org/10.2105/AJPH.2011.300232>.
- Brown, Vicki, Alison Barr, Jan Scheurer, Anne Magnus, Belen Zapata-Diomed, and Rebecca Bentley. 2019. “Better Transport Accessibility, Better Health: A Health Economic Impact Assessment Study for Melbourne, Australia.” *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity* 16 (89). <https://doi.org/10.1186/s12966-019-0853-y>.
- Cakmak, Sabit, Robert Dales, and Claudia Blanco-Vidal. 2007. “Air Pollution and Mortality in Chile: Susceptibility among the Elderly.” *Environmental Health Perspectives* 115 (4): 524–27. <https://doi.org/10.1289/ehp.9567>.
- . 2010. “Air Pollution and Hospitalization for Epilepsy in Chile.” *Environment International* 36 (6): 501–5. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2010.03.008>.
- Cakmak, Sabit, Robert Dales, Timur Gultekin, Claudia Blanco-Vidal, Marcelo Fernandez, Maria Angelica Rubio, and Pedro Oyola. 2009a. “Components of Particulate Air Pollution and Mortality in Chile.” *International Journal of Occupational and Environmental Health* 15 (2): 152–58. <https://doi.org/10.1179/oeht.2009.15.2.152>.
- Cakmak, Sabit, Robert Dales, Timur Gultekin, Claudia Blanco-Vidal, Marcelo Fernandez, Maria Rubio, and Pedro Oyola. 2009b. “Components of Particulate Air Pollution and Emergency Department Visits in Chile.” *Archives of Environmental and Occupational Health* 64 (3): 148–55. <https://doi.org/10.1080/19338240903240228>.
- Cartier, Yuri, Tarik Benmarhnia, and Astrid Brousselle. 2015. “Tool for Assessing Health and Equity Impacts of Interventions Modifying Air Quality in Urban Environments.” *Evaluation and Program Planning* 53: 1–9.

- <https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2015.07.004>.
- Centro de Análisis de Políticas Públicas. 2016. "Informe País. Estado Del Medio Ambiente En Chile. Comparación 1999-2015." *Universidad de Chile*.
- Centro Mario Molina. 2008. "Evaluación Del Impacto Del Transantiago En La Calidad Del Aire de La Region Metropolitana, Año 2007."
- Chan, Margareth, and Marc Danzon. 2005. *Air Quality Guidelines. Global Update 2005. World Health Organization*. Vol. 3. <https://doi.org/10.1007/BF02986808>.
- Cifuentes, Luis A., Jeanette Vega, Katherine Köpfer, and Lester B. Lave. 2000. "Effect of the Fine Fraction of Particulate Matter versus the Coarse Mass and Other Pollutants on Daily Mortality in Santiago, Chile." *Journal of the Air and Waste Management Association* 50 (8): 1287–98. <https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10464167>.
- Clark, Andrew F., and Darren M. Scott. 2016. "Barriers to Walking: An Investigation of Adults in Hamilton (Ontario, Canada)." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13 (179). <https://doi.org/10.3390/ijerph13020179>.
- Cohen, Aaron J., Michael Brauer, Richard Burnett, H. Ross Anderson, Joseph Frostad, Kara Estep, Kalpana Balakrishnan, et al. 2017. "Estimates and 25-Year Trends of the Global Burden of Disease Attributable to Ambient Air Pollution: An Analysis of Data from the Global Burden of Diseases Study 2015." *The Lancet* 389 (10082): 1907–18. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6).
- Cumby, Robert E., and John Huizinga. 1992. "Testing the Autocorrelation Structure of Disturbances in Ordinary Least Squares." *Econometrica* 60 (1): 185–95. <https://doi.org/10.2307/2951684>.
- D.S. N° 114/02 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República. 2002. *Norma de Calidad Primaria de Aire Para Dióxido de Nitrogeno (NO2)*. Chile.
- D.S. N° 59/98 Ministerio Secretaría General de la Presidencia. 1998. *Norma de Calidad Primaria Para MP10*. Chile.
- D.S. N°115/02 del Ministerio Secretaria General de la Presidencia. 2002. *Norma de Calidad Primaria de Aire Para Monóxido de Carbono (CO)*. Chile.
- Dales, Robert, Sabit Cakmak, and Claudia Blanco-Vidal. 2009. "Air Pollution and Hospitalization for Headache in Chile." *American Journal of Epidemiology* 170 (8): 1057–66. <https://doi.org/10.1093/aje/kwp217>.
- . 2010. "Air Pollution and Hospitalization for Venous Thromboembolic Disease in Chile." *Journal of Thrombosis and Haemostasis* 8 (4): 669–74. <https://doi.org/10.1111/j.1538-7836.2010.03760.x>.
- Dennis, Jessica, Tim Ramsay, Alexis F. Turgeon, and Ryan Zarychanski. 2013. "Helmet

- Legislation and Admissions to Hospital for Cycling Related Head Injuries in Canadian Provinces and Territories: Interrupted Time Series Analysis.” *BMJ (Online)* 346 (f2674). <https://doi.org/10.1136/bmj.f2674>.
- Derde, Lennie P.G., Ben S. Cooper, Herman Goossens, Surbhi Malhotra-Kumar, Rob J.L. Willems, Marek Gniadkowski, Waleria Hryniewicz, et al. 2014. “Interventions to Reduce Colonisation and Transmission of Antimicrobial-Resistant Bacteria in Intensive Care Units: An Interrupted Time Series Study and Cluster Randomised Trial.” *The Lancet Infectious Diseases* 14: 31–39. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(13\)70295-0](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(13)70295-0).
- DS N°104/2019 Ministerio del Medio Ambiente. 2019. *Establece Norma Primaria de Calidad de Aire Para Dióxido de Azufre (SO2)*. Chile.
- DS N°12/2012 Ministerio del Medio Ambiente. 2012. *Norma de Calidad Primaria Para Material Particulado Fino Respirable MP2.5*. Chile.
- European Commission. n.d. “Air Quality Standards.” Accessed July 1, 2019. <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>.
- Fernández, E., J. De Cea, and H. Malbran. 2008. “Demand Responsive Urban Public Transport System Design: Methodology and Application.” *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 42 (7): 951–72. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2007.12.008>.
- Figuroa, Eugenio, Andrés Gómez-Lobo, Pablo Jorquera, and Felipe Labrín. 2013. “Develando Económicamente Los Impactos Sobre La Concentración Atmosférica de Material Particulado de Un Proyecto de Remodelación Del Transporte Urbano: El Caso Del Transantiago En Chile.” *Estudios de Economía* 40 (1): 53–79. <https://doi.org/10.4067/S0718-52862013000100003>.
- Fleeman, N., and A. Scott-Samuel. 2000. “A Prospective Health Impact Assessment of the Merseyside Integrated Transport Strategy (MerITS).” *Journal of Public Health Medicine* 22 (3): 268–74. <https://doi.org/10.1093/pubmed/22.3.268>.
- Forastiere, Francesco, Massimo Stafoggia, Carola Tasco, Sally Picciotto, Nerina Agabiti, Giulia Cesaroni, and Carlo A. Perucci. 2007. “Socioeconomic Status, Particulate Air Pollution, and Daily Mortality: Differential Exposure or Differential Susceptibility.” *American Journal of Industrial Medicine* 50: 208–16. <https://doi.org/10.1002/ajim.20368>.
- Gallardo, Laura, Francisco Barraza, Andrés Ceballos, Mauricio Galleguillos, Nicolás Huneeus, Fabrice Lambert, Cecilia Ibarra, et al. 2018. “Evolution of Air Quality in Santiago: The Role of Mobility and Lessons from the Science-Policy Interface.” *Elem Sci Anth* 6 (38). <https://doi.org/10.1525/elementa.293>.

- Gallego, Francisco, Juan Pablo Montero, and Christian Salas. 2013. "The Effect of Transport Policies on Car Use: Evidence from Latin American Cities." *Journal of Public Economics* 107: 47–62. <https://doi.org/10.1016/j.jpubeco.2013.08.007>.
- Geer, Laura A. 2014. "Identifying Exposure Disparities in Air Pollution Epidemiology Specific to Adverse Birth Outcomes." *Environmental Research Letters* 9: 1–3. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/101001>.
- Giles, Luisa V., Prabjit Barn, Nino Künzli, Isabelle Romieu, Murray A. Mittleman, Stephan van Eeden, Ryan Allen, et al. 2011. "From Good Intentions to Proven Interventions: Effectiveness of Actions to Reduce the Health Impacts of Air Pollution." *Environmental Health Perspectives* 119 (1): 29–36. <https://doi.org/10.1289/ehp.1002246>.
- Gobierno de Chile. 2008. "Revisión, Reformulación y Actualización Del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica Para La Región Metropolitana, Resolución N° 1.600 de 2008 de La Contraloría General de La República." [www.leychile.cl](http://www.leychile.cl).
- Gorman, Dermot, M. J. Douglas, L. Conway, P. Noble, and P. Hanlon. 2003. "Transport Policy and Health Inequalities: A Health Impact Assessment of Edinburgh's Transport Policy." *Public Health* 117: 15–24. [https://doi.org/10.1016/S0033-3506\(02\)00002-1](https://doi.org/10.1016/S0033-3506(02)00002-1).
- Graham, Hilary, and Michael P. Kelly. 2004. "Health Inequalities: Concepts, Frameworks and Policy." *NHS, Health Development Agency*, 1–12.
- Grundy, Chris, Rebecca Steinbach, Phil Edwards, Judith Green, Ben Armstrong, and Paul Wilkinson. 2009. "Effect of 20 Mph Traffic Speed Zones on Road Injuries in London, 1986-2006: Controlled Interrupted Time Series Analysis." *BMJ (Online)* 339 (b4469). <https://doi.org/10.1136/bmj.b4469>.
- Harper, Sam, Eric Ruder, Henry A. Roman, Amelia Geggel, Onyemaechi Nweke, Devon Payne-Sturges, and Jonathan I. Levy. 2013. "Using Inequality Measures to Incorporate Environmental Justice into Regulatory Analyses." *International Journal of Environmental Research and Public Health*. <https://doi.org/10.3390/ijerph10094039>.
- Hawe, Penelope, and Louise Potvin. 2009. "What Is Population Health Intervention Research?" *Canadian Journal of Public Health* 100 (1): 18–14. <https://doi.org/10.1007/bf03405503>.
- Hawton, Keith, Helen Bergen, Sue Simkin, Sue Dodd, Phil Pocock, William Bernal, David Gunnell, and Navneet Kapur. 2013. "Long Term Effect of Reduced Pack Sizes of Paracetamol on Poisoning Deaths and Liver Transplant Activity in England and Wales: Interrupted Time Series Analyses." *BMJ (Online)* 346 (f403). <https://doi.org/10.1136/bmj.f403>.
- Ilabaca, Mauricio, Ignacio Olaeta, Elizabeth Campos, Jeannette Villaire, Martha Maria

- Tellez-Rojo, and Isabelle Romieu. 1999. "Association between Levels of Fine Particulate and Emergency Visits for Pneumonia and Other Respiratory Illnesses among Children in Santiago, Chile." *Journal of the Air and Waste Management Association* 49 (9): 154–63. <https://doi.org/10.1080/10473289.1999.10463879>.
- Instituto Nacional de Estadísticas. 2015. "Anuario Parque de Vehículos 2015." [www.ine.cl](http://www.ine.cl).
- Jebb, Andrew T., Louis Tay, Wei Wang, and Qiming Huang. 2015. "Time Series Analysis for Psychological Research: Examining and Forecasting Change." *Frontiers in Psychology* 6 (727). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00727>.
- Jhun, Iny, Pedro Oyola, Francisco Moreno, Marcela A. Castillo, and Petros Koutrakis. 2013. "PM<sub>2.5</sub> mass and Species Trends in Santiago, Chile, 1998 to 2010: The Impact of Fuel-Related Interventions and Fuel Sales." *Journal of the Air and Waste Management Association* 63 (2): 161–69. <https://doi.org/10.1080/10962247.2012.742027>.
- Jorquera, Hector, German Orrego, Julio Castro, and Velisa Vesovic. 2004. "Trends in Air Quality and Population Exposure in Santiago, Chile, 1989-2001." *International Journal of Environment and Pollution* 22 (4): 507–30. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2004.005684>.
- Kontopantelis, Evangelos, Tim Doran, David A. Springate, Iain Buchan, and David Reeves. 2015. "Regression Based Quasi-Experimental Approach When Randomisation Is Not an Option: Interrupted Time Series Analysis." *BMJ (Online)* 350: h2750. <https://doi.org/10.1136/bmj.h2750>.
- Koutrakis, Petros, Sonja N Sax, Jeremy a Sarnat, Brent Coull, Phil Demokritou, Pedro Oyola, Javier Garcia, and Ernesto Gramsch. 2005. "Analysis of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and PM<sub>2.5-10</sub> Concentrations in Santiago, Chile, from 1989 to 2001." *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995) 55 (3): 342–51. <https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464627>.
- Künzli, Nino, and Laura Pérez. 2007. "Los Beneficios Para La Salud Pública de La Reducción de La Contaminación Atmosférica En El Área Metropolitana de Barcelona." *Pdf*, 1–64. [http://www.creal.cat/media/upload/arxiu/assessorament/Informe\\_contaminacio\\_esp.pdf](http://www.creal.cat/media/upload/arxiu/assessorament/Informe_contaminacio_esp.pdf).
- Lagarde, Mylene. 2012. "How to Do (or Not to Do)...Assessing the Impact of a Policy Change with Routine Longitudinal Data." *Health Policy and Planning*, no. 27: 76–83. <https://doi.org/10.1093/heapol/czr004>.
- Lau, Wallis C.Y., Macey Murray, Aisha El-Turki, Sonia Saxena, Shamez Ladhani, Paul Long, Mike Sharland, Ian C.K. Wong, and Yingfen Hsia. 2015. "Impact of

- Pneumococcal Conjugate Vaccines on Childhood Otitis Media in the United Kingdom.” *Vaccine*, no. 33: 5072–79. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2015.08.022>.
- Laurent, Olivier, Denis Bard, Laurent Filleul, and Claire Segala. 2007. “Effect of Socioeconomic Status on the Relationship between Atmospheric Pollution and Mortality.” *Journal of Epidemiology and Community Health*. <https://doi.org/10.1136/jech.2006.053611>.
- Li, Shanshan, Gail Williams, Bin Jalaludin, and Peter Baker. 2012. “Panel Studies of Air Pollution on Children’s Lung Function and Respiratory Symptoms: A Literature Review.” *Journal of Asthma*. <https://doi.org/10.3109/02770903.2012.724129>.
- Linden, Ariel. 2015. “Conducting Interrupted Time Series Analysis for Single and Multiple Group Comparisons.” *The Stata Journal* 15 (2): 480–500. <https://doi.org/10.1093/ije/dyt092>.
- Liu, Hai Ying, Daniel Dunea, Stefania Iordache, and Alin Pohoata. 2018. “A Review of Airborne Particulate Matter Effects on Young Children’s Respiratory Symptoms and Diseases.” *Atmosphere*. <https://doi.org/10.3390/atmos9040150>.
- López-Bernal, James, Steven Cummins, and Antonio Gasparrini. 2017. “Interrupted Time Series Regression for the Evaluation of Public Health Interventions: A Tutorial.” *International Journal of Epidemiology* 46 (1): 348–55. <https://doi.org/10.1093/ije/dyw098>.
- Lopez, Russell. 2012. *The Built Environment and Public Health*. 1st ed. San Francisco CA: Jossey-Bass.
- Maguire, Kelly, and Glenn Sheriff. 2011. “Comparing Distributions of Environmental Outcomes for Regulatory Environmental Justice Analysis.” *International Journal of Environmental Research and Public Health* 8: 1707–26. <https://doi.org/10.3390/ijerph8051707>.
- Matthews, John. 2014. “Beaufort Scale.” In *Encyclopedia of Environmental Change*. <https://doi.org/10.4135/9781446247501.n376>.
- Ministerio del Medio Ambiente Gobierno de Chile. n.d. “Sistema de Información Nacional de Calidad Del Aire (SINCA).” Accessed March 20, 2019. <https://sinca.mma.gob.cl/index.php/>.
- Montgomery, Douglas, Cheryl Jennings, and Murat Kulahci. 2008. *Introduction to Time Series Analysis and Forecasting*. 1st ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Muñoz, Juan Carlos, Marco Batarce, and Dario Hidalgo. 2014. “Transantiago, Five Years after Its Launch.” *Research in Transportation Economics* 48: 184–93. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2014.09.041>.

- Muñoz, Juan Carlos, Juan de Dios Ortúzar, and Antonio Gschwender. 2009. "Transantiago: The Fall and Rise of a Radical Public Transport Intervention." In *Travel Demand Management and Road User Pricing: Success, Failure and Feasibility*.
- O'Donnell, Owen, Eddy van Doorslaer, Adam Wagstaff, and Magnus Lindelow. 2007. *Analyzing Health Equity Using Household Survey Data*. *Analyzing Health Equity Using Household Survey Data*. <https://doi.org/10.1596/978-0-8213-6933-3>.
- O'Neill, Jennifer, Hilary Tabish, Vivian Welch, Mark Petticrew, Kevin Pottie, Mike Clarke, Tim Evans, et al. 2014. "Applying an Equity Lens to Interventions: Using PROGRESS Ensures Consideration of Socially Stratifying Factors to Illuminate Inequities in Health." *Journal of Clinical Epidemiology* 67: 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2013.08.005>.
- Osses, Axel, Laura Gallardo, and Tania Faundez. 2013. "Analysis and Evolution of Air Quality Monitoring Networks Using Combined Statistical Information Indexes." *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology* 65. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v65i0.19822>.
- Ostro, Bart, Gunnar Eskeland, Jose Sanchez, and Tarhan Feyzioglu. 1999. "Air Pollution and Health Effects: A Study of Medical Visits among Children in Santiago, Chile." *Environmental Health Perspectives* 107 (1): 69–73. <https://doi.org/10.1289/ehp.9910769>.
- Ostro, Bart, Jose Sanchez, C Aranda, and Gunnar Eskeland. 1995. "Air Pollution and Mortality: Results from a Study of Santiago, Chile." *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 6 (1): 97–114. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8777376>.
- Prieto-Parra, Laura, Karla Yohannessen, Cecilia Brea, Daniella Vidal, Carlos A. Ubilla, and Pablo Ruiz-Rudolph. 2017. "Air Pollution, PM2.5 composition, Source Factors, and Respiratory Symptoms in Asthmatic and Nonasthmatic Children in Santiago, Chile." *Environment International* 101: 190–200. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.01.021>.
- República, D.S. N° 112/02 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la. 2002. *Norma de Calidad Primaria de Aire Para Ozono (O3)*. Chile.
- Rojas-Rueda, D., A. de Nazelle, O. Teixidó, and MJ J. Nieuwenhuijsen. 2013. "Health Impact Assessment of Increasing Public Transport and Cycling Use in Barcelona: A Morbidity and Burden of Disease Approach." *Preventive Medicine*. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2013.07.021>.
- Romero, H., M. Ihl, A. Rivera, P. Zalazar, and P. Azocar. 1999. "Rapid Urban Growth, Land-Use Changes and Air Pollution in Santiago, Chile." In *Atmospheric Environment*,

- 33:4039–47. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00145-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00145-4).
- Rose-Pérez, R. 2015. “Environmental Justice and Air Quality in Santiago de Chile [Justicia Medioambiental y Calidad de Aire En Santiago de Chile].” *Revista de Salud Pública* 17 (3): 337–50. <https://doi.org/10.15446/rsap.v17n3.38465>.
- Sanhueza, P, C Vargas, and J Jiménez. 1999. “Daily Mortality in Santiago and Its Relationship with Air Pollution.” *Revista Medica de Chile* 127 (2): 235–42. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0033071194&partnerID=40&md5=96b9fe366a3f48d54a3cf65b83309a23>.
- Sax, Sonja N., Petros Koutrakis, Pablo A. Ruiz Rudolph, Francisco Cereceda-Balic, Ernesto Gramsch, and Pedro Oyola. 2007. “Trends in the Elemental Composition of Fine Particulate Matter in Santiago, Chile, from 1998 to 2003.” *Journal of the Air and Waste Management Association* 57 (7): 845–55. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.57.7.845>.
- Schneider, Maria Cristina, Carlos Castillo-Salgado, Jorge Bacallao, Enrique Loyola, Oscar J. Mujica, Manuel Vidaurre, and Anne Roca. 2002. “Métodos de Medición de Las Desigualdades de Salud.” *Revista Panamericana de Salud Pública/Pan American Journal of Public Health* 12 (6): 398–415. <https://doi.org/10.1590/S1020-49892002001200006>.
- Secretaría de Planificación del Transporte. 2001. “Encuesta Origen-Destino de Santiago 2001.”
- . 2012. “Encuesta Origen-Destino de Santiago 2012.”
- Secretaría Regional Ministerial de Desarrollo Social. 2014. “Región Metropolitana de Santiago, Índice de Prioridad Social de Comunas 2014.”
- Shadish, W R, T D Cook, and D T Campbell. 2002. *Experimental and Quasi-Experimental Designs for Generalized Causal Inference*. Boston: Houghton Mifflin. *Experimental and Quasi-Experimental Designs for Generalized Causal Inference*.
- Shaw, Caroline, Edward Randal, Michael Keall, and Alistair Woodward. 2018. “Health Consequences of Transport Patterns in New Zealand’s Largest Cities.” *New Zealand Medical Journal* 131 (1472).
- Suh, H. H., T. Bahadori, J. Vallarino, and J. D. Spengler. 2000. “Criteria Air Pollutants and Toxic Air-Pollutants.” *Environmental Health Perspectives* 108 (suppl 4): 625–33.
- Thomson, Katie, Frances Hillier-Brown, Adam Todd, Courtney McNamara, Tim Huijts, and Clare Bamba. 2018. “The Effects of Public Health Policies on Health Inequalities in High-Income Countries: An Umbrella Review.” *BMC Public Health* 18: 1–21. <https://doi.org/10.1186/s12889-018-5677-1>.
- Thurston, George D., Howard Kipen, Isabella Annesi-Maesano, John Balmes, Robert D.



- Brook, Kevin Cromar, Sara De Matteis, et al. 2017. "A Joint ERS/ATS Policy Statement: What Constitutes an Adverse Health Effect of Air Pollution? An Analytical Framework." *European Respiratory Journal*. <https://doi.org/10.1183/13993003.00419-2016>.
- Toro, Richard, Raúl Morales, Mauricio Canales, Claudio Gonzalez-Rojas, and Manuel Leiva. 2014. "Inhaled and Inspired Particulates in Metropolitan Santiago Chile Exceed Air Quality Standards." *Building and Environment* 79 (2014): 115–23. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.004>.
- Ureta, Sebastián. 2014. "Normalizing Transantiago: On the Challenges (and Limits) of Repairing Infrastructures." *Social Studies of Science* 44 (3): 368–92. <https://doi.org/10.1177/0306312714523855>.
- Valdés, Ana, Antonella Zanobetti, Jaana I. Halonen, Luis Cifuentes, Diego Morata, and Joel Schwartz. 2012. "Elemental Concentrations of Ambient Particles and Cause Specific Mortality in Santiago, Chile: A Time Series Study." *Environmental Health: A Global Access Science Source* 11 (1). <https://doi.org/10.1186/1476-069X-11-82>.
- Villalobos, Ana M., Francisco Barraza, Héctor Jorquera, and James J. Schauer. 2015. "Chemical Speciation and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Santiago, Chile, 2013." *Science of the Total Environment* 512–513: 133–42. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.006>.
- Wang, Li, Buqing Zhong, Sotiris Vardoulakis, Fengying Zhang, Eva Pilot, Yonghua Li, Linsheng Yang, Wuyi Wang, and Thomas Krafft. 2016. "Air Quality Strategies on Public Health and Health Equity in Europe—A Systematic Review." *International Journal of Environmental Research and Public Health*. <https://doi.org/10.3390/ijerph13121196>.
- Zhang, Fang, Anita K. Wagner, and Dennis Ross-Degnan. 2011. "Simulation-Based Power Calculation for Designing Interrupted Time Series Analyses of Health Policy Interventions." *Journal of Clinical Epidemiology* 64: 1252–61. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2011.02.007>.

## 13. Anexos

**Tabla A 1. Estudios que han evaluado la calidad del aire en Santiago antes y después de la implementación del TS en el año 2007.**

<b>Autor/objetivo</b>	<b>Contaminante</b>	<b>Análisis</b>	<b>Principales resultados</b>
Figuroa 2013	MP <sub>10</sub>	Modelo de efectos fijos por estación de monitoreo y día de la semana	Se excluyó del modelo: vb lluvia y episodios de emergencia
Impacto de TS en concentración de MP <sub>10</sub>	1998-2010 (solo meses abril-agosto) Diario (promedio simple de 24 horas)  7 estaciones de monitoreo: IN, LC, PO, PU, BO, LF, CE	Modelo Prais Winsten (AR1) Vb dep: MP <sub>10</sub> Vb indep: Transantiago Covariables: MP <sub>10 t-1</sub> , tiempo, Misumi diario (inversión), índice mensual crecimiento económico, lluvia diaria, corte gas (% diario de restricción envíos de gas natural), episodios de contaminación	Índice Misumi: relación positiva entre inversión térmica y concentración de MP <sub>10</sub> IMACEC: impacto positivo sobre las concentraciones Restricción en los envíos de gas desde Argentina impactaron el MP <sub>10</sub> diario (100% de restricción en un día implicó un $\uparrow >15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en concentración diaria de MP <sub>10</sub> (conversión del sector industrial hacia fuentes energéticas más contaminantes) TS: concentraciones de MP <sub>10</sub> han $\downarrow$ desde 2007. Con $\downarrow$ de corto plazo de $2,61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (modelo con 1 rezago de vb. respuesta) y una $\downarrow$ de largo plazo de $3,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Modelo de Prais Winsten entrega valor un poco más alto $-4,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Bohme 2016 (tesis) Efecto de TS en la concentración de MP <sub>10</sub> , MP <sub>2,5</sub> , NOx, CO	MP <sub>10</sub> , MP <sub>2,5</sub> , NOx, (promedio simple de 24 horas) log CO (media horaria 7 a 9 am en días de semana) (proxy de flujo vehicular)  2000-2015 (solo meses abril-agosto) No considera datos desde 10 feb 2007 al 9 feb 2008) 7 estaciones de monitoreo: IN, LC, PO, PU, BO, LF, CE	Modelo de efectos fijos por estación de monitoreo, mes y día de la semana  <b>M1:</b> Vb dep: log CO <b>M2:</b> Vb dep: MP <sub>10</sub> , MP <sub>2,5</sub> , NOx Vb indep: Transantiago Covariables: log CO (media 1 a 5 am), cont t-1, Misumi diario, Precio combustibles mensual, lluvia diaria, temp, vel. viento, HR, tiempo, concentración permitida S en combustibles, IMACEC, corte gas (% diario restricción de envíos de gas natural), concentración permitida de S en combustibles	Conclusión: TS tuvo un impacto positivo al reducir las concentraciones de MP <sub>10</sub>  <b>M1:</b> estima el efecto del Transantiago en el uso de automóviles (usando CO como proxy). Transantiago no tuvo un efecto en el uso de automóviles particulares, ni en las concentraciones de CO en el aire.  <b>M2:</b> estima el efecto del Transantiago en los contaminantes MP <sub>10</sub> $\downarrow$ debido al Transantiago en al menos $6,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ MP <sub>2,5</sub> $\uparrow$ debido al Transantiago (solo 3 modelos sig, $\uparrow$ al menos $2,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) NOx 3 estaciones, resultados sig. + y -, ambiguo
Gallego 2013	CO Diario (7-9 am de días laborales)	Modelo de efectos fijos por hora, día y mes	TS: sin impacto en el CO a corto plazo (1° mes) y un aumento en el nivel ciudad de 27% a largo plazo (app. 7 meses después de TS), en este caso, el aumento de CO es una

<p>Evaluar el efecto de TS en la concentración de CO (adquisición de vehículos particulares)</p>	<p>2005-2009 (2 años antes y 2 después)</p> <p>7 estaciones de monitoreo: BO, CN, PU, CE, IN, LC, LF</p>	<p>Vb dep: log CO (media 7-9 am)</p> <p>Vb indep: Transantiago</p> <p>Covariables: CO (media 1-5 am), tiempo, temperatura, HR, precipitación, presión atmosférica, vel viento, dir viento (diarios), tipo de cambio real y precio de la gasolina (mensual), inversión térmica, SO<sub>2</sub></p>	<p>combinación de más automóviles (de hogares de diferentes niveles de ingresos) y más congestión.</p> <p>Resultados por estaciones: efecto a corto plazo (-) no sig. por estaciones</p> <p>Correlación + entre el tamaño del coeficiente y el grado ex ante de dependencia del transporte público y correlación - con el ingreso del hogar</p> <p>Efecto a largo plazo fue menor en comunas ricas (LC~20%) que en comunas pobres (CN, PU, CE~40%)</p>
<p>Centro Mario Molina 2008</p> <p>Identificar cambios de flujos de los buses en vías troncales y cambios de distribución de concentración MP<sub>10</sub> y NOx relacionados con TS</p>	<p>MP<sub>10</sub> y NOx</p> <p>Meses de invierno 2006 vs 2007</p> <p>2 sitios de monitoreo a nivel de calle (troncal, troncal+alimentador) para contaminantes</p> <p>6 sitios con cámaras que filmaron los flujos vehículos entre las 7:00 y 8:00</p>	<p>Modelo de tipo Street Canyon, que considera la circulación particular dentro del cajón cerrado por los edificios</p>	<p>Niveles de MP<sub>10</sub> y NOx a nivel global en la ciudad de Santiago fueron mayores (45%) durante el período de campañas del mes de Julio 2007 vs 2006 (Estación PO representa bien el comportamiento general)</p> <p>Conteo de flujos vehiculares muestra una reducción importante del número de buses, que en el caso del sitio ubicado en Alameda Bernardo O'Higgins es de un 59%, y en el de Gran Avenida alcanza a un 47%. El transporte público es la única categoría con una reducción del número de vehículos/hora, a diferencia de los automóviles, cuyos flujos aumentaron en un 27 y en un 10%</p> <p>NOx a nivel de calle disminuyó en un 50%, aunque esto ha sido contrarrestado en parte importante por el aumento del transporte privado.</p>
<p>Barraza 2017</p> <p>Evaluar tendencia MP<sub>2,5</sub></p> <p>Evaluar tendencia de las fuentes de MP<sub>2,5</sub></p>	<p>MP<sub>2,5</sub> y composición</p> <p>1998-2012</p> <p>1243 muestras de 24 horas (cada 4 días)</p> <p>Estación de monitoreo: PO</p>	<p><b>Fuentes:</b> modelo de receptores UNMIX</p> <p><b>Tendencia:</b> regresión del cambio a largo plazo 1998-2012;</p> <p>vb dep: fuente de contribución µg/m<sup>3</sup> (log transformado)</p> <p>vb indep: tiempo</p> <p><b>Comparación:</b> prueba de Mann-Whitney (320, 480 y 650 días)</p>	<p>Concentración total de MP<sub>2,5</sub> ha disminuido. Fuentes no variaron en la misma proporción, su contribución cambió en los 15 años.</p> <p>Principal reducción: emisiones de <b>fundición de cobre</b> (↓ contribución de 33% 1998-1999 a 5% 2011-2012): mejoras tecnológicas en las fundiciones</p> <p><b>Vehículos motorizados</b> ↓ 2,17 µg/m<sup>3</sup> (21%), reducción no lineal. 2000-2002 ↓ 2,89 µg/m<sup>3</sup> (27%) (mejora de la calidad de la gasolina); 2003-2006 ↑ (por ↑ n° vehículos motorizados en Santiago); 2007-2008 ↑ 5,68 µg/m<sup>3</sup> (56,64%); 2010-2011 vs 2004-2005 ↓ largo plazo de 3,04 µg/m<sup>3</sup> (32,41%) atribuible a implementación de TS</p> <p><b>Fuentes industriales</b> ↓ 1998 a 2012 en 2,63 µg/m<sup>3</sup> (39%). 2002 ↓ 2,52 µg/m<sup>3</sup> (34%) vs 2001 (↓S en diésel); 2005-2007 ↑ (por reducción gas natural de Argentina). 2010-2012 ↓ 1,76 µg/m<sup>3</sup> (31%) vs 2004-2008 (estado chileno importa gas natural de otros países)</p> <p><b>Polvo urbano</b> ↑ de 3 a 7% (↑ anual n° automóviles, y desde 2010 Chile central con sequía prolongada)</p> <p><b>Humo de leña</b> sin cambios (en estación fría su contribución es 30%)</p> <p><b>Fuentes costeras:</b> ↓ 1,48 µg/m<sup>3</sup> (58%)</p>

<p>Toro 2014 Estudiar las tendencias a largo plazo y la variabilidad espacial de MP<sub>2,5</sub> y MP<sub>10</sub> en Santiago, Chile.</p>	<p>MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub> (anual, superación estándar diario)  2000-2012 4 estaciones de monitoreo: PO, PU, LC, LF</p>	<p>Análisis de ANOVA Tendencias temporales: enfoque de Theile-Sen</p>	<p>MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> anual: disminución general en las concentraciones antes de 2005, mientras que se produjo un aumento en 2007 y de 2008 a 2009.</p> <p>Se observó una disminución del % de días en que se supera el estándar diario chileno y el valor recomendado por la OMS en el período 2000-2012 en ambos contaminantes, con diferencias entre las estaciones de monitoreo. No obstante, aún se siguen superando los estándares.</p>
<p>Juhn 2013  Evaluar tendencia ajustada (meteorología) Evaluar impacto de intervenciones relacionadas con el combustible y ventas de combustible</p>	<p>MP<sub>2,5</sub>  1998-2010 1059 muestras de 24 horas  Estación de monitoreo: PO</p>	<p>Modelo de regresión aditivo generalizado, con uso de funciones spline de suavizado para evaluar las relaciones no lineales Vb dep: MP<sub>2,5</sub>, S, K, Fe, Br, Pb, Cr, Ni Vb indep: datos mensuales de ventas de combustibles de petróleo (PBF), gas natural y gas licuado (GLP) Covariables: año, mes, día de la semana, vel. viento, temperatura y humedad relativa</p>	<p>- <b>MP<sub>2,5</sub> anual:</b> ↓ 32 µg/m<sup>3</sup> entre 1989 y 1997 (76 a 44 µg/m<sup>3</sup>) y ↓ 13 µg/m<sup>3</sup> entre 1998 y 2009 (43 a 30 µg/m<sup>3</sup>). MP<sub>2,5</sub> ajustado a meteorología fueron inferiores en 21,8 µg/m<sup>3</sup> en 2009/2010 vs 1998/1999.</p> <p>↑ MP<sub>2,5</sub> anual de 7,9 µg/m<sup>3</sup> entre 2005-2008 (máximo en 2007), cuya tendencia fue robusta a influencias meteorológicas, sugiere que variación climática no causo el repentino aumento</p> <p>Vel. viento media de 24 horas bajo 1 m/s se asoció ↑ MP<sub>2,5</sub> diario</p> <p>- <b>Eliminación Pb de gasolina (2001):</b> ↓ Pb (0,366 a 0,026 µg/m<sup>3</sup>) y Br (0,110 a 0,008 µg/m<sup>3</sup>) entre 1998 y 2010</p> <p>- <b>Reducción S de 1.500 ppm a 50 ppm:</b> ↓ S ambiental de 1,59 a 1,08 µg/m<sup>3</sup> (32%)</p> <p>Tendencia de S ajustada a meteorología mostró un ↑ en 2005-2008, otras especies de MP<sub>2,5</sub> también siguieron este patrón: trazadores de combustión de biomasa (K), tráfico (Cr, Fe) y combustión de petróleo (Ni)</p> <p>Menor disponibilidad de gas natural en 2004 fue consistente con el aumento en el S ambiental, y el aumento en las ventas de PBF en 2004-2008.</p>

**Tabla A 2. Elementos del marco PROGRESS y breve descripción.**

<b>Factor</b>	<b>Descripción</b>
<b>P</b> <i>Place of residence</i> <b>Lugar de residencia</b>	El lugar de residencia es un determinante importante de la salud. Este elemento puede referirse a lugares de residencia rurales, urbanos e interior urbano. También puede incluir la región, comuna o barrio donde viven las personas, por ejemplo, un barrio desfavorecido dentro de una ciudad. El rol del lugar de residencia como determinante de la salud va más allá del NSE, las características de un barrio, comuna o región, como la contaminación del aire, la calidad del agua, la cantidad de áreas verdes, entre otros, también pueden contribuir a la desventaja.
<b>R</b> <i>Race, ethnicity, culture, and language</i> <b>Raza, etnia, cultura e idioma</b>	Existen muchas diferencias en los resultados de salud entre las diferentes razas, etnias, culturas e idiomas. La raza generalmente se considera biológicamente determinada, mientras que la cultura y el origen étnico incluyen aspectos sociales. Sin embargo, la "raza" en la investigación relacionada con las desigualdades, muestra pocas diferencias relacionadas con la biología y la genética; la mayoría de las desigualdades raciales se derivan de las experiencias sociales de los "grupos racializados". Existen impactos sociales y políticos que pueden desempeñar un papel importante en las desventajas en salud y que requieren considerar la raza.
<b>O</b> <i>Occupation</i> <b>Ocupación</b>	Este factor abarca diferentes situaciones, incluyendo el desempleo, el subempleo, los trabajadores informales y los entornos laborales inseguros. El estado ocupacional en una organización está fuertemente relacionado con la mortalidad y una variedad de resultados de salud.
<b>G</b> <i>Gender, sex</i> <b>Género y sexo</b>	El sexo, o las diferencias biológicas entre hombres y mujeres, no siempre es inequitativo ya que existen diferencias entre hombres y mujeres que son inevitables. No obstante, el género se refiere a roles construidos socialmente y otros rasgos que la sociedad generalmente asocia con los sexos.
<b>R</b> <i>Religion</i> <b>Religión</b>	La religión contribuye a las desigualdades cuando el acceso a los servicios de salud es limitado para un subgrupo de la población debido a su religión (o falta de religión). La religión no indica inequidad si, por ejemplo, una persona declina la atención de salud basándose en creencias religiosas, sin embargo, esto es difícil al considerar niños u otras personas que no pueden decidir sobre su religión.
<b>E</b> <i>Education</i> <b>Educación</b>	La educación es un determinante importante del estado de salud porque afecta el tipo de empleo para el que una persona es elegible, lo que a su vez se correlaciona con los ingresos. Las personas con un mayor nivel de educación tienen más probabilidades de tener estilos de vida más saludables, tener más conocimiento sobre la salud y las medidas preventivas.
<b>S</b> <i>Socioeconomic Status</i> <b>Nivel socioeconómico (NSE)</b>	El NSE tiene una influencia importante en el estado de salud de una persona. Un NSE más alto generalmente significa mejoras en muchos determinantes de la salud, como mejores condiciones de vida y acceso a alimentos frescos y nutritivos. Las desigualdades en los ingresos afectan las posibilidades de vida de una persona y, por lo tanto, afectan la salud.
<b>S</b> <i>Social capital</i> <b>Capital social (CS)</b>	El CS se refiere a las relaciones y redes sociales. Incluye la confianza entre los miembros de una comunidad, la participación cívica, la disposición de los miembros de una comunidad para ayudarse mutuamente y facilitar la realización de objetivos colectivos, y la fortaleza de sus conexiones políticas que pueden facilitar el acceso a los servicios. El CS está interrelacionado con SES, a medida que aumenta la desigualdad de ingresos en una comunidad, disminuye el CS.

**Tabla A 3. Correlación de Pearson entre las concentraciones observadas e imputadas de cada contaminante según estación de monitoreo**

Concentraciones observadas	Concentraciones imputadas							
	BO	CE	CN	IN	LC	LF	PO	PU
<b>Promedio diario</b>								
<b>MP<sub>10</sub></b>	0,65	0,62	0,71	0,68	0,62	0,67	0,66	0,71
<b>MP<sub>2,5</sub></b>	0,76	0,73	0,77	0,75	0,66	0,74	0,75	0,77
<b>O<sub>3</sub></b>	0,82	0,82	0,84	0,80	0,81	0,82	0,84	0,82
<b>CO</b>	0,78	0,77	0,86	0,83	0,81	0,83	0,77	0,78
<b>Máximo diario</b>								
<b>MP<sub>10</sub></b>	0,60	0,45	0,68	0,56	0,39	0,62	0,59	0,68
<b>MP<sub>2,5</sub></b>	0,72	0,66	0,73	0,62	0,62	0,67	0,69	0,72
<b>O<sub>3</sub></b>	0,66	0,64	0,68	0,69	0,77	0,69	0,68	0,66
<b>CO</b>	0,75	0,77	0,81	0,78	0,79	0,79	0,76	0,76

Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU). Todas las correlaciones tienen valores  $p < 0,05$

**Tabla A 4. Estadísticas descriptivas de las temperaturas diarias y comparación entre el período previo y posterior a la introducción de TS según estación de monitoreo.**

	Período 2001-2006		Período 2008-2013		p-valor*
	Media (DE)	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	Media (DE)	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	
<b>T° media (°C)</b>					
BO	16,4 (5,1)	16,3 (12,1-20,6)	15,8 (5,4)	15,7 (11,3-20,6)	<b>0,001</b>
CE	16,5 (4,6)	16,5 (12,5-20,4)	16,6 (5,0)	16,7 (12,4-20,9)	0,593
CN	18,8 (6,1)	19,3 (13,9-23,8)	14,3 (6,9)	14,7 (10,1-19,6)	<b>&lt;0,001</b>
IN	17,0 (4,9)	17,1 (12,9-21,2)	17,0 (5,4)	17,0 (12,6-21,6)	0,999
LC	15,5 (4,7)	15,5 (11,8-19,5)	15,5 (5,4)	15,3 (11,2-20,0)	0,793
LF	17,3 (5,0)	17,6 (13,2-21,7)	15,5 (5,8)	15,4 (10,8-20,6)	<b>&lt;0,001</b>
PO	16,6 (4,8)	16,6 (12,5-20,5)	15,5 (5,5)	15,2 (10,9-20,3)	<b>&lt;0,001</b>
PU	16,5 (4,8)	16,5 (12,4-20,5)	16,7 (5,4)	17,1 (12,2-21,2)	0,154
<b>T° mínima (°C)</b>					
BO	10,6 (4,6)	10,5 (7,9-13,6)	9,3 (4,7)	9,2 (6,0-13,2)	<b>&lt;0,001</b>
CE	11,1 (3,6)	11,1 (8,7-14,0)	10,6 (5,2)	10,9 (7,8-14,2)	0,064
CN	11,7 (4,9)	12,2 (9,0-15,1)	7,8 (5,7)	8,4 (4,7-11,9)	<b>&lt;0,001</b>
IN	11,7 (3,7)	11,6 (9,1-14,6)	11,0 (5,1)	11,1 (7,9-14,7)	<b>0,002</b>
LC	9,9 (3,6)	10,0 (7,4-12,7)	9,5 (4,6)	9,4 (6,3-12,9)	<b>0,007</b>
LF	11,3 (5,3)	11,5 (8,7-14,9)	8,9 (5,3)	9,1 (5,4-13,0)	<b>&lt;0,001</b>
PO	10,9 (3,8)	11,0 (8,5-13,7)	8,9 (4,8)	9,0 (5,8-12,6)	<b>&lt;0,001</b>
PU	10,6 (4,7)	10,8 (8,2-13,8)	10,5 (5,1)	10,9 (7,3-14,2)	0,874
<b>T° máxima (°C)</b>					
BO	23,0 (6,4)	23,7 (17,6-28,3)	23,0 (6,5)	23,8 (17,7-28,6)	0,635
CE	22,7 (6,0)	23,4 (17,5-27,8)	23,1 (6,2)	23,8 (18,2-28,3)	<b>0,029</b>
CN	27,3 (7,7)	28,9 (21,8-33,4)	21,6 (8,6)	22,9 (16,6-28,1)	<b>&lt;0,001</b>
IN	23,4 (6,3)	24,2 (18,0-28,8)	23,8 (6,7)	24,7 (18,6-29,5)	<b>0,025</b>
LC	22,0 (6,2)	23,1 (16,9-27,3)	22,3 (6,6)	23,2 (17,2-27,8)	0,217
LF	24,0 (6,3)	24,9 (18,7-29,4)	23,0 (6,9)	24,0 (17,6-28,9)	<b>&lt;0,001</b>
PO	23,1 (6,2)	23,9 (17,8-28,3)	22,9 (6,7)	23,6 (17,5-28,6)	0,596
PU	23,0 (6,1)	23,7 (17,8-28,2)	23,7 (6,4)	24,7 (18,5-29,2)	<b>0,001</b>

Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU); \*test de Mann-Whitney; en negritas valores significativos (p<0,05)

**Tabla A 5. Estadísticas descriptivas de la humedad relativa y la velocidad del viento y comparación entre el período previo y posterior a la introducción de TS según estación de monitoreo.**

	Período 2001-2006		Período 2008-2013		p-valor*
	Media (DE)	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	Media (DE)	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	
<b>Humedad relativa (%)</b>					
BO	66,6 (14,6)	65,6 (55,7-78,3)	59,9 (13,3)	59,3 (49,8-69,8)	<b>&lt;0,001</b>
CE	70,5 (15,1)	70,8 (59,6-82,5)	61,7 (14,8)	62,0 (50,0-73,4)	<b>&lt;0,001</b>
CN	-	-	49,0 (24,1)	54,9 (37,4-67,5)	-
IN	63,6 (15,7)	63,0 (51,2-75,8)	57,0 (14,5)	56,5 (45,6-68,1)	<b>&lt;0,001</b>
LC	63,5 (14,6)	62,0 (52,9-74,2)	58,1 (13,9)	57,3 (48,0-67,9)	<b>&lt;0,001</b>
LF	60,2 (14,4)	58,9 (49,6-71,2)	58,8 (12,8)	57,7 (48,7-68,6)	<b>0,014</b>
PO	64,4 (14,6)	64,1 (53,4-76,1)	60,7 (13,5)	60,3 (50,0-71,1)	<b>&lt;0,001</b>
PU	65,2 (14,3)	65,0 (54,2-76,6)	60,0 (14,4)	60,2 (49,4-70,9)	<b>&lt;0,001</b>
<b>Velocidad del viento (m/s)</b>					
BO	1,5 (0,4)	1,5 (1,2-1,8)	1,4 (0,5)	1,4 (1,1-1,8)	<b>&lt;0,001</b>
CE	2,1 (0,7)	2,0 (1,5-2,7)	2,1 (0,8)	2,1 (1,4-2,8)	<b>&lt;0,001</b>
CN	-	-	1,5 (0,7)	1,4 (0,8-2,1)	-
IN	1,1 (0,3)	1,1 (0,9-1,4)	1,1 (0,3)	1,1 (0,8-1,3)	<b>&lt;0,001</b>
LC	1,3 (0,3)	1,4 (1,1-1,5)	1,3 (0,2)	1,3 (1,1-1,4)	<b>&lt;0,001</b>
LF	0,8 (0,2)	0,8 (0,7-0,9)	1,1 (0,3)	1,1 (0,9-1,3)	<b>&lt;0,001</b>
PO	1,3 (0,4)	1,3 (0,9-1,6)	1,2 (0,4)	1,2 (0,8-1,6)	<b>&lt;0,001</b>
PU	2,0 (0,9)	1,9 (1,4-2,5)	1,7 (0,6)	1,6 (1,2-2,1)	<b>&lt;0,001</b>

Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU); \*test de Mann-Whitney; en negritas valores significativos (p<0,05)



**Tabla A 6. Estadísticas descriptivas de los niveles máximos diarios de contaminantes MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> y comparación entre el período previo y posterior a la introducción de TS según estación de monitoreo.**

	Período 2001-2006		Período 2008-2013		p-valor*
	Media (DE)	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	Media (DE)	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	
<b>MP<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>					
BO	89,5 (37,4)	80,2 (63,2-107,8)	83,4 (32,0)	76,7 (60,7-101,3)	<b>&lt;0,001</b>
CE	85,0 (35,8)	77,8 (59,5-103,3)	76,3 (29,5)	70,0 (55,1-92,4)	<b>&lt;0,001</b>
CN	95,7 (48,0)	81,7 (58,9-130,5)	80,9 (43,7)	66,0 (50,1-101)	<b>&lt;0,001</b>
IN	78,7 (31,7)	70,7 (56,6-93,8)	71,0 (26,6)	64,5 (52,0-85,5)	<b>&lt;0,001</b>
LC	59,7 (18,7)	57,7 (47,8-69,8)	58,4 (18,5)	56,3 (45,4-69,5)	<b>0,014</b>
LF	86,9 (32,9)	79,9 (63,2-105)	81,8 (30,5)	74,1 (59,5-100,7)	<b>&lt;0,001</b>
PO	81,4 (37,7)	69,7 (55,1-98,5)	80,7 (33,7)	71,7 (56,5-99,6)	0,326
PU	84,5 (43,3)	71,8 (54,4-105)	75,8 (39,2)	63,4 (48,7-92,2)	<b>&lt;0,001</b>
<b>MP<sub>2,5</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>					
BO	-	-	32,8 (17,1)	27,2 (20,3-42,2)	-
CE	-	-	31,9 (16,3)	27,0 (19,5-41,3)	-
CN	-	-	34,0 (23,4)	24,7 (17,3-44,0)	-
IN	-	-	28,4 (12,3)	25,4 (19,3-36,0)	-
LC	29,6 (11,8)	27,1 (21,6-34,8)	23,9 (8,5)	22,4 (17,9-28,4)	<b>&lt;0,001</b>
LF	38,9 (17,5)	34,1 (26,2-48,1)	31,5 (13,3)	28,6 (21,5-38,8)	<b>&lt;0,001</b>
PO	40,6 (22,7)	31,3 (24,7-51,4)	32,0 (15,5)	28,0 (20,4-40,1)	<b>&lt;0,001</b>
PU	41,1 (25,1)	31,2 (22,2-58,9)	32,7 (21,7)	25,6 (17,7-40,7)	<b>&lt;0,001</b>

Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU); \*test de Mann-Whitney, en negritas valores significativos (p<0,05)

**Tabla A 7. Estadísticas descriptivas de los niveles máximos diarios de contaminantes O<sub>3</sub> y CO y comparación entre el período previo y posterior a la introducción de TS según estación de monitoreo.**

	Período 2001-2006		Período 2008-2013		p-valor*
	Media (DE)	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	Media (DE)	P <sub>50</sub> (P <sub>25</sub> -P <sub>75</sub> )	
<b>O<sub>3</sub> (ppb)</b>					
BO	16,3 (7,0)	17,4 (10,3-21,8)	14,9 (6,8)	15,9 (9,3-20)	<b>&lt;0,001</b>
CE	19,1 (7,9)	19,9 (12,4-25,3)	18,3 (7,7)	19,3 (11,5-24,2)	<b>&lt;0,001</b>
CN	15,5 (7,0)	16,4 (9,3-21)	15,7 (7,3)	17 (8,9-21,5)	0,282
IN	14,9 (7,3)	15,7 (8-20,7)	14 (7,0)	14,8 (7,6-19,7)	<b>&lt;0,001</b>
LC	21,7 (10,8)	22,7 (11,6-30,5)	19,8 (9,7)	20,9 (10,7-27,7)	<b>&lt;0,001</b>
LF	18,1 (8,1)	19,3 (11,3-24,5)	16,5 (7,6)	16,7 (9,9-22,4)	<b>&lt;0,001</b>
PO	18,5 (8,9)	20 (10,4-25,8)	16,5 (8,0)	18 (8,8-23)	<b>&lt;0,001</b>
PU	17,9 (7,3)	19 (11,7-23,6)	16,4 (7,0)	17,7 (10-22)	<b>&lt;0,001</b>
<b>CO (ppm)</b>					
BO	1,3 (1,0)	0,9 (0,5-1,8)	1,0 (0,8)	0,8 (0,4-1,5)	<b>&lt;0,001</b>
CE	1,0 (1,0)	0,6 (0,2-1,5)	0,9 (0,7)	0,6 (0,3-1,3)	<b>0,002</b>
CN	1,8 (1,7)	1,2 (0,3-2,9)	1,1 (1,2)	0,6 (0,3-1,6)	<b>&lt;0,001</b>
IN	1,0 (0,9)	0,7 (0,3-1,5)	0,9 (0,6)	0,6 (0,4-1,2)	<b>0,023</b>
LC	0,8 (0,4)	0,6 (0,4-1)	0,6 (0,3)	0,5 (0,4-0,8)	<b>&lt;0,001</b>
LF	1,2 (0,8)	0,9 (0,6-1,8)	1,0 (0,6)	0,8 (0,5-1,3)	<b>&lt;0,001</b>
PO	1,2 (1,2)	0,6 (0,2-1,8)	0,9 (0,7)	0,6 (0,3-1,3)	0,531
PU	1,1 (1,2)	0,6 (0,3-1,5)	1,0 (1,0)	0,6 (0,3-1,4)	0,298

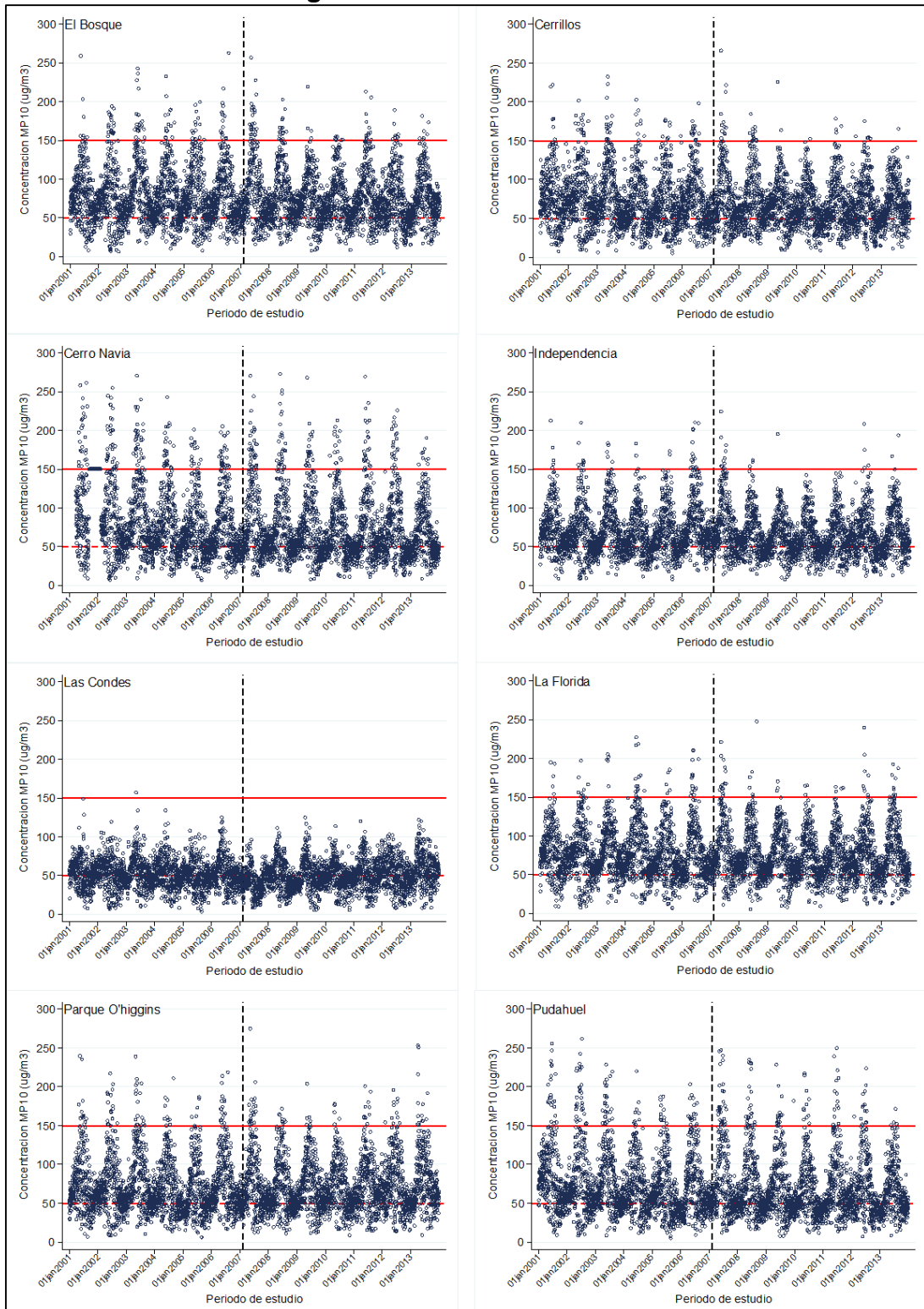
Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU); \*test de Mann-Whitney, en negritas valores significativos (p<0,05)

**Tabla A 8. Concentraciones anuales de MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> en todas las estaciones de monitoreo durante el período de estudio.**

	Estaciones de monitoreo							
	BO	CE	CN	IN	LC	LF	PO	PU
<b>MP<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>								
2001	75,9	76,2	117,0	70,2	53,5	77,4	70,8	82,0
2002	75,4	75,9	90,1	67,7	52,3	75,2	71,2	77,1
2003	83,0	77,5	84,4	71,2	54,3	78,3	77,5	77,3
2004	77,1	67,8	75,7	62,5	52,6	80,7	67,9	67,0
2005	77,6	68,7	69,3	66,0	49,8	72,2	62,3	64,3
2006	78,6	72,0	73,0	77,7	53,6	75,5	74,4	69,6
2007	79,2	70,4	75,0	72,2	42,6	77,4	70,6	72,8
2008	75,5	70,3	74,5	62,8	48,8	72,8	66,8	69,7
2009	73,1	66,7	71,8	62,0	50,0	73,5	70,8	67,2
2010	70,2	63,5	68,6	59,7	48,9	69,1	67,2	63,0
2011	77,0	66,2	70,4	63,2	53,3	72,5	71,6	67,6
2012	68,8	64,8	69,3	63,2	52,5	71,9	70,9	64,8
2013	75,5	68,4	65,5	67,2	57,3	75,9	76,4	62,3
<b>MP<sub>2,5</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>								
2001					25,9	34,7	34,5	49,7
2002					24,9	32,2	35,0	34,1
2003					27,5	34,1	40,1	36,3
2004					25,7	36,3	34,9	33,6
2005					26,6	33,6	34,0	30,7
2006					24,8	34,4	34,0	32,9
2007					25,7	34,0	33,8	32,6
2008					21,7	35,2	32,5	34,4
2009	31,1	27,7	30,7	28,8	23,2	29,7	29,6	29,0
2010	27,6	28,6	29,4	25,1	20,5	26,1	26,1	27,3
2011	28,8	31,2	30,2	24,7	20,5	26,5	26,6	27,4
2012	27,5	25,0	28,6	23,5	19,8	25,5	26,2	26,4
2013	29,1	26,3	26,9	24,4	21,5	25,4	27,7	24,4

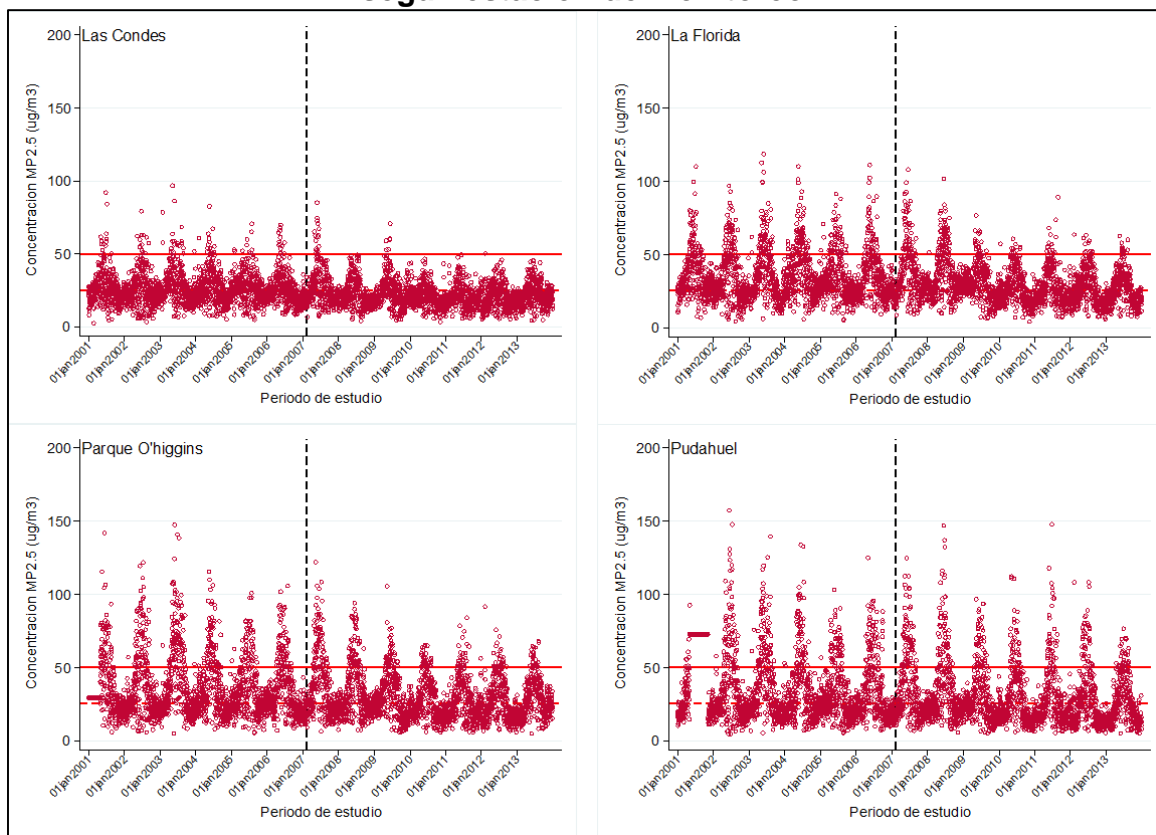
Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU)

**Figura A 1. Serie de tiempo de las concentraciones máximas diarias de MP<sub>10</sub> según estación de monitoreo.**



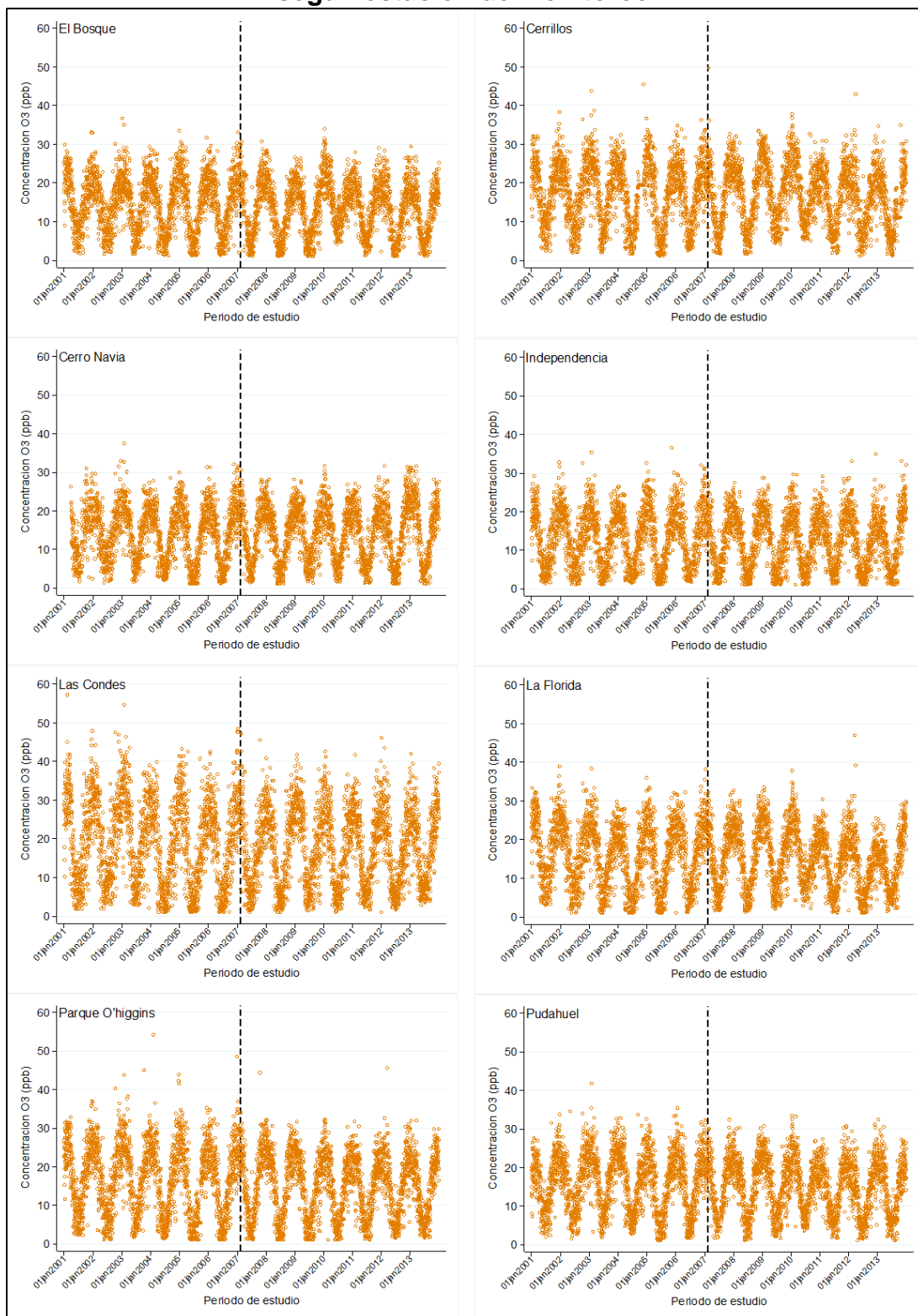
Línea roja continua: estándar diario chileno (MP<sub>10</sub>: 150 µg/m<sup>3</sup>); línea roja punteada: valor guía OMS (MP<sub>10</sub>: 50 µg/m<sup>3</sup>); línea vertical negra: implementación TS (10 de febrero de 2007)

**Figura A 2. Serie de tiempo de las concentraciones máximas diarias de MP<sub>2,5</sub> según estación de monitoreo.**



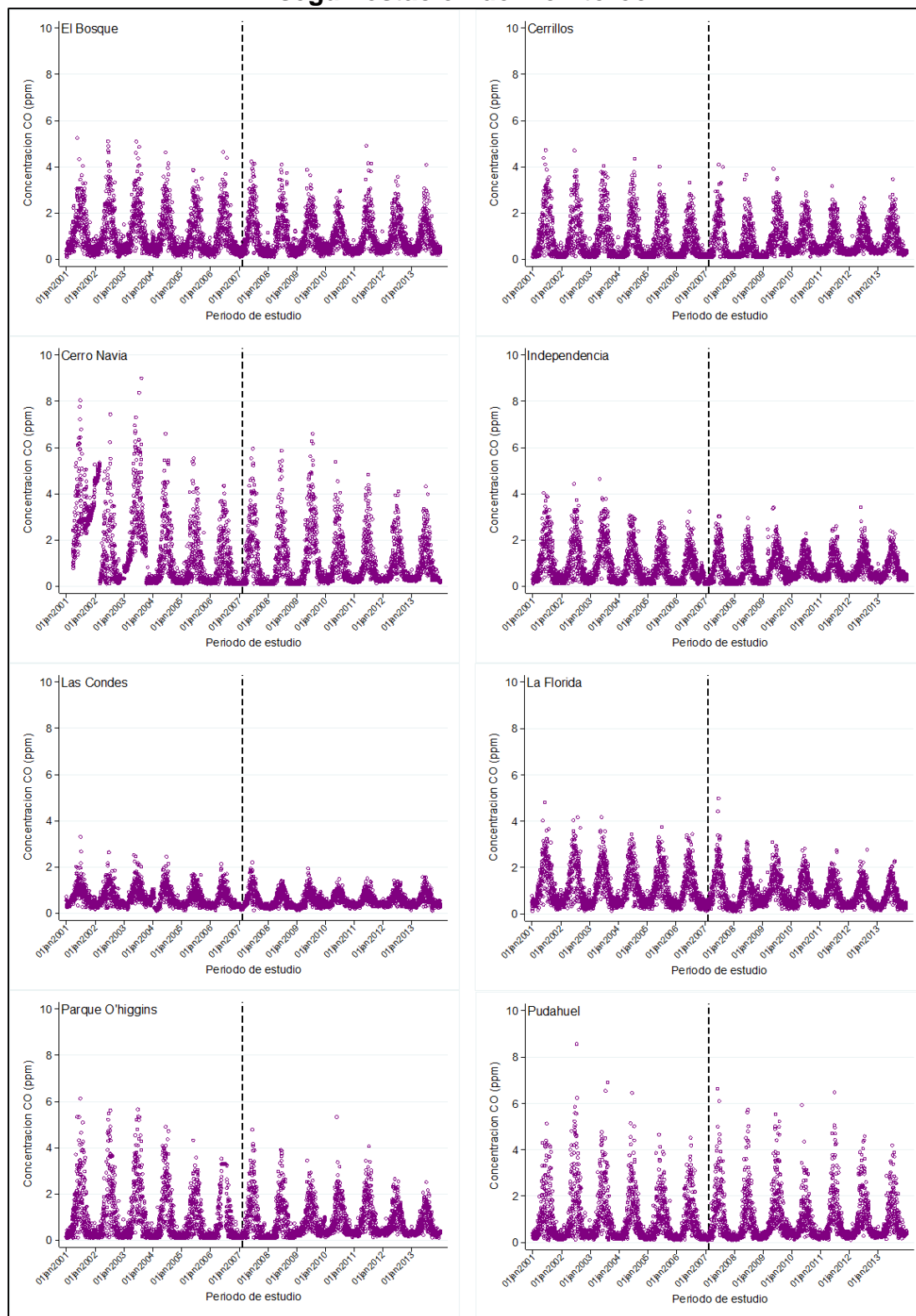
Línea roja continua: estándar anual chileno (MP<sub>2,5</sub>: 50 µg/m<sup>3</sup>); línea roja punteada: valor guía OMS (MP<sub>2,5</sub>: 25 µg/m<sup>3</sup>); línea vertical negra: implementación TS (10 de febrero de 2007)

**Figura A 3. Serie de tiempo de las concentraciones máximas diarias de O<sub>3</sub> según estación de monitoreo.**



Línea vertical negra: implementación TS (10 de febrero de 2007)

**Figura A 4. Serie de tiempo de las concentraciones máximas diarias de CO según estación de monitoreo.**



Línea vertical negra: implementación TS (10 de febrero de 2007)

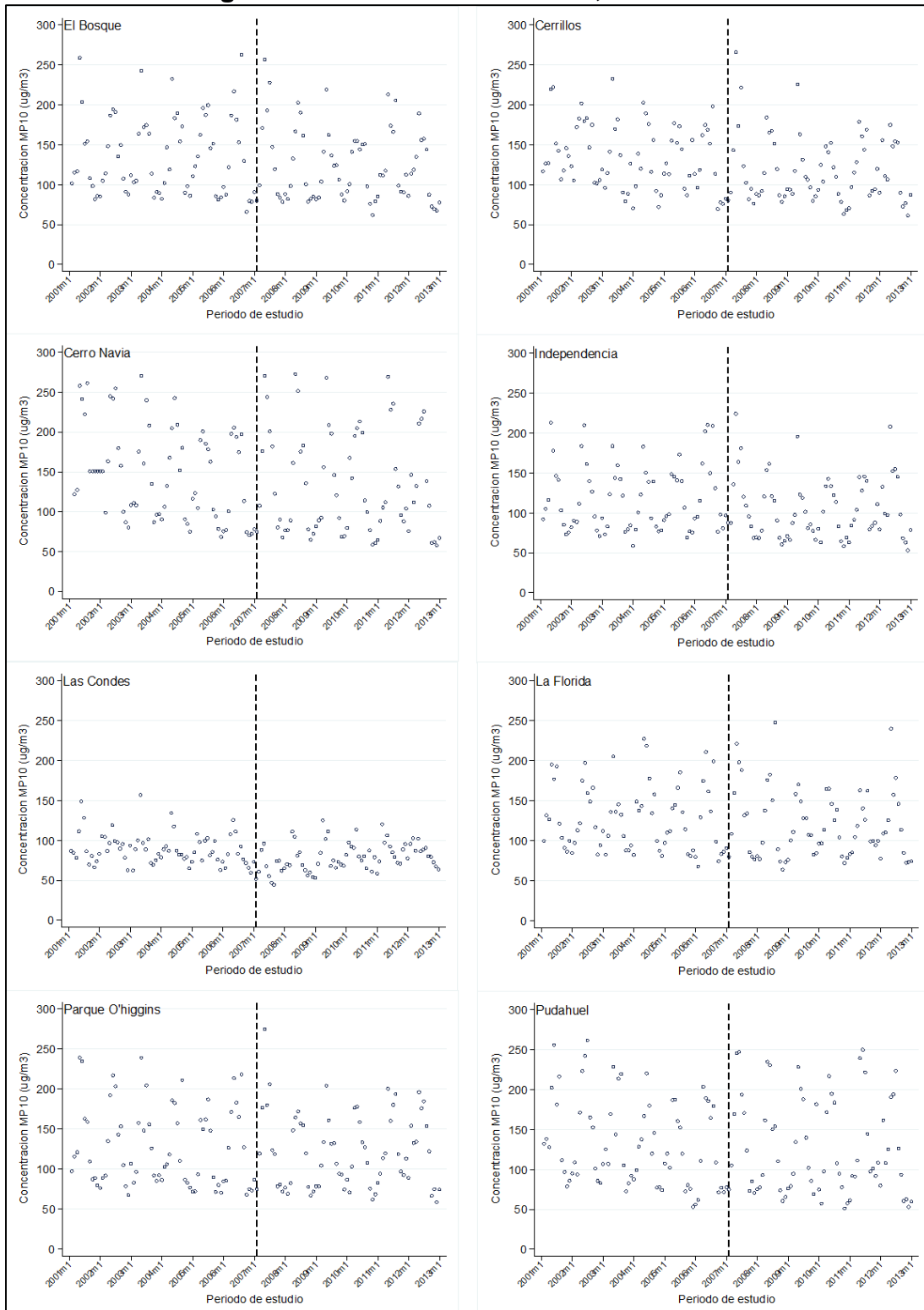
**Tabla A 9. Estadísticas descriptivas de los máximos mensuales de los promedios diarios de los contaminantes MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub>, O<sub>3</sub> y CO y comparación entre el período previo y posterior a la intervención (TS).**

	Pre-intervención		Post-intervención		p-valor*
	Media (DE)	P <sub>50</sub> (min-max)	Media (DE)	P <sub>50</sub> (min-max)	
<b>MP<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>					
BO	135,5 (48,4)	120,4 (91,0-172,6)	123,9 (45,0)	112,3 (85,5-154,7)	0,1014
CE	134,6 (40,3)	126,6 (103,9-169,1)	118,0 (41,3)	106,5 (87,7-148,2)	<b>0,0059</b>
CN	148,1 (58,0)	150,5 (97,0-193,6)	135,4 (64,3)	113,1 (78,6-189,3)	0,1076
IN	118,3 (41,1)	104,0 (82,8-144,5)	105,0 (37,9)	96,6 (77,6-130,3)	<b>0,0383</b>
LC	89,2 (19,7)	85,8 (75,4-99,1)	79,3 (17,7)	78,2 (67,4-90,6)	<b>0,0031</b>
LF	127,4 (40,9)	119,2 (91,0-153,7)	120,1 (42,3)	108,9 (84,0-147,7)	0,1681
PO	127,5 (49,9)	109,7 (85,8-161,6)	122,1 (46,2)	118,7 (78,6-158,0)	0,5136
PU	133,0 (54,2)	119,9 (85,9-175,4)	127,2 (59,8)	106,4 (76,8-176,8)	0,3396
<b>MP<sub>2,5</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>					
LC	47,1 (17,0)	41,4 (33,3-57,5)	37,4 (12,4)	34,8 (27,6-44,3)	<b>&lt;0,001</b>
LF	59,3 (23,1)	55,2 (40,9-77,8)	49,6 (19,6)	43,5 (35,7-60,4)	<b>0,0077</b>
PO	65,5 (31,7)	55,5 (36,4-90,0)	52,0 (23,6)	43,6 (32,8-66,3)	<b>0,0093</b>
PU	67,9 (32,7)	63,3 (40,3-88,7)	58,6 (33,5)	46,7 (32,4-86,1)	<b>0,0339</b>
<b>O<sub>3</sub> (ppb)</b>					
BO	23,1 (7,0)	25,6 (18,4-28,3)	21,1 (6,6)	22,6 (16,2-26,4)	<b>0,0432</b>
CE	26,5 (8,1)	28,5 (20,1-32,0)	26,0 (7,9)	27,4 (19,8-31,7)	0,6175
CN	22,4 (7,2)	24,6 (16,8-27,5)	21,3 (6,9)	23,3 (15,1-26,8)	0,3904
IN	22,3 (7,4)	23,6 (16,2-28,2)	20,7 (7,1)	22,7 (14,2-25,6)	0,1620
LC	33,1 (10,9)	35,3 (26,9-41,0)	29,7 (10,5)	33,3 (20,5-37,6)	0,0559
LF	25,7 (7,6)	27,5 (21,1-30,9)	23,5 (7,7)	25,3 (17,6-29,7)	<b>0,0418</b>
PO	27,3 (10)	29,7 (19,4-33,5)	23,6 (8,5)	25,8 (15,7-30,4)	<b>0,0104</b>
PU	24,9 (7,6)	27,0 (18,7-30,8)	22,6 (7,1)	24,5 (15,7-27,8)	<b>0,0368</b>
<b>CO (ppm)</b>					
BO	2,3 (1,4)	1,6 (1,0-3,4)	1,8 (1,2)	1,4 (0,8-2,8)	0,0544
CE	1,8 (1,3)	1,2 (0,6-2,8)	1,5 (1,1)	1,1 (0,6-2,3)	0,2307
CN	3,1 (2,3)	3,0 (1,0-5,0)	2,1 (1,8)	1,5 (0,6-3,8)	<b>0,0082</b>
IN	1,8 (1,2)	1,4 (0,7-2,8)	1,4 (0,9)	1,1 (0,6-2,1)	<b>0,0400</b>
LC	1,2 (0,7)	1,0 (0,6-1,7)	0,9 (0,4)	0,8 (0,5-1,3)	<b>0,0203</b>
LF	2,0 (1,2)	1,5 (0,9-3,1)	1,6 (0,9)	1,2 (0,8-2,2)	<b>0,0379</b>
PO	2,2 (1,7)	1,7 (0,7-3,3)	1,6 (1,2)	1,2 (0,6-2,5)	0,0914
PU	2,3 (2,0)	1,5 (0,7-3,9)	2,1 (1,8)	1,4 (0,6-3,2)	0,4466

Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU); \*test de Mann-Whitney, en negritas valores significativos (p<0,05)

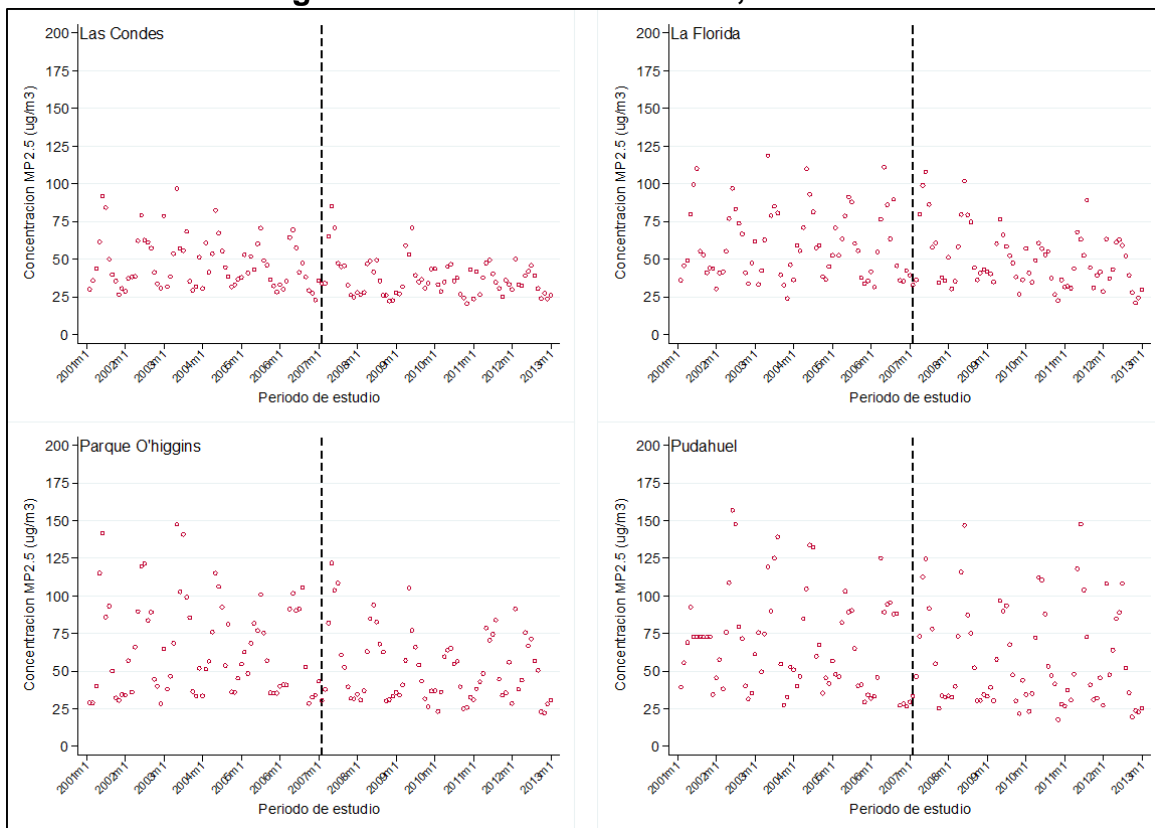


**Figura A 5. Gráficos de dispersión de los máximos mensuales de MP<sub>10</sub> según estaciones de monitoreo, 2001-2013.**



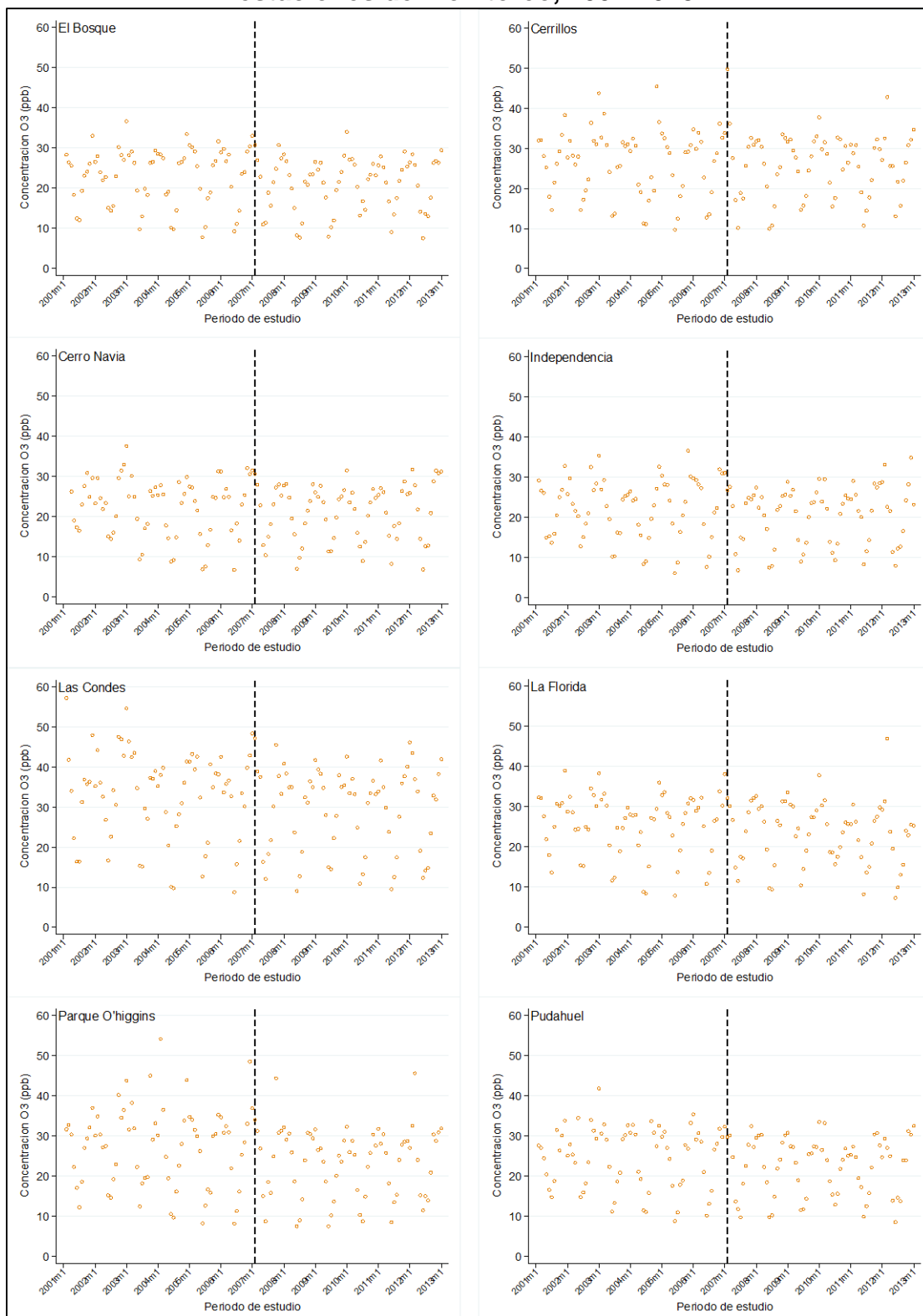
Línea negra: introducción de TS.

**Figura A 6. Gráficos de dispersión de los máximos mensuales de MP<sub>2,5</sub> según estaciones de monitoreo, 2001-2013.**



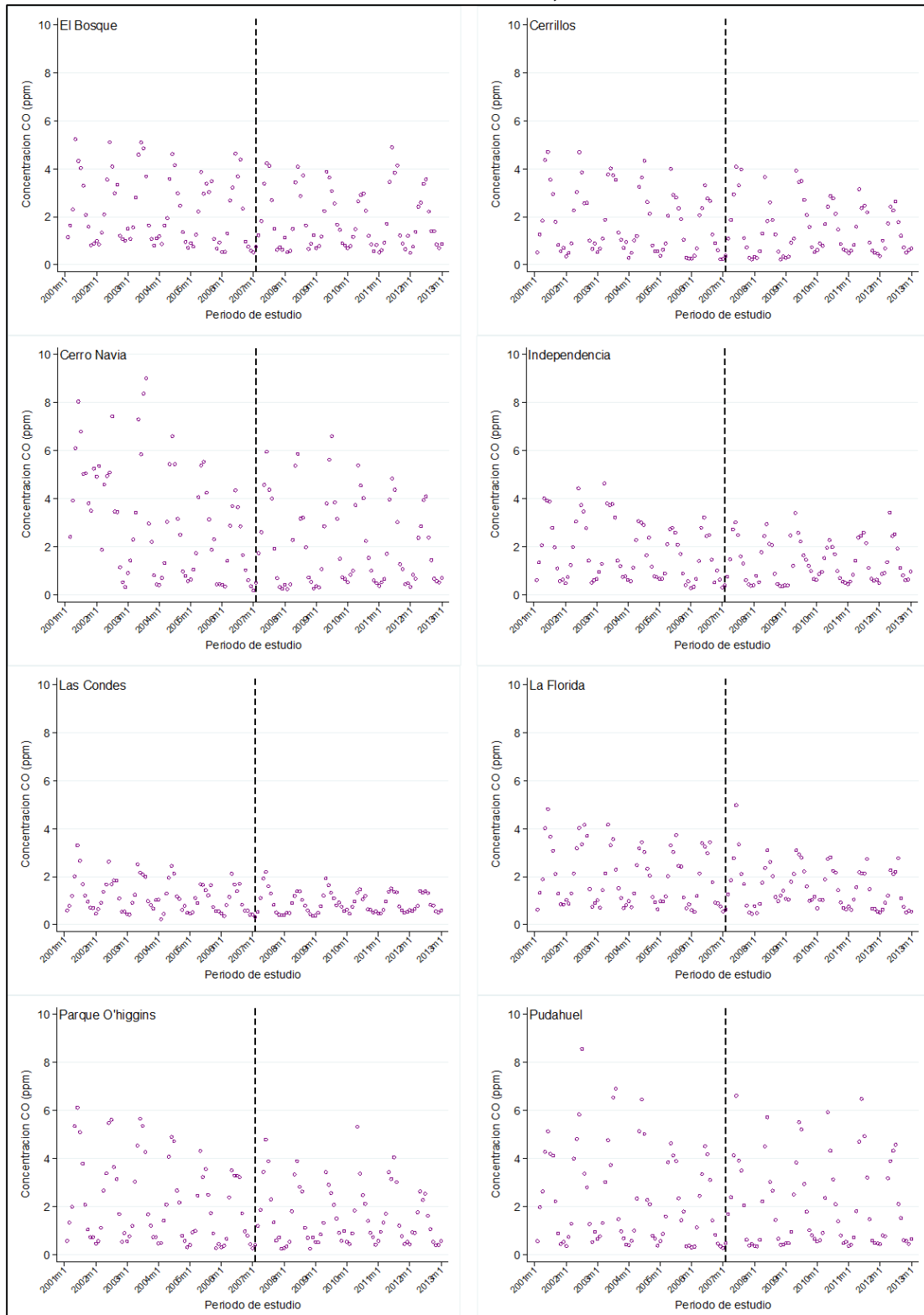
Línea negra: introducción de TS.

**Figura A 7. Gráficos de dispersión de los máximos mensuales de O<sub>3</sub> según estaciones de monitoreo, 2001-2013.**



Línea negra: introducción de TS.

**Figura A 8. Gráficos de dispersión de los máximos mensuales de CO según estaciones de monitoreo, 2001-2013.**



Línea negra: introducción de TS.

**Tabla A 10. Coeficientes estimados de los modelos basales de STI para las medias mensuales de MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub>, O<sub>3</sub> y CO y sus intervalos de confianza del 95%.**

<b>Modelo basal <math>\beta</math> (IC95%)</b>					
	<b>Int</b>	<b>T</b>	<b>Xt</b>	<b>T*X</b>	
	<b>B<sub>0</sub> (IC95%)</b>	<b>B<sub>1</sub> (IC95%)</b>	<b>B<sub>2</sub> (IC95%)</b>	<b>B<sub>3</sub> (IC95%)</b>	<b>Tend (IC95%)</b>
<b>MP<sub>10</sub> (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>					
BO	80,24	-0,07 (-0,28;0,15)	6,1 (-8,29;20,49)	-0,14 (-0,47;0,19)	-0,21 (-0,46;0,04)
CE	79,46	<b>-0,19 (-0,38;-0,001)</b>	7,4 (-5,05;19,84)	0,02 (-0,27;0,3)	-0,17 (-0,39;0,04)
CN	108,91	<b>-0,73 (-1,02;-0,43)</b>	<b>21,61 (4,36;38,85)</b>	<b>0,52 (0,09;0,95)</b>	-0,21 (-0,52;0,11)
IN	69,42	-0,004 (-0,2;0,2)	0,3 (-12,12;12,71)	-0,16 (-0,44;0,13)	-0,16 (-0,36;0,04)
LC	54,74	-0,06 (-0,15;0,03)	-4,83 (-11,25;1,59)	<b>0,17 (0,02;0,31)</b>	0,11 (-0,01;0,22)
LF	80,53	-0,12 (-0,31;0,08)	6,13 (-7,13;19,4)	-0,04 (-0,34;0,26)	-0,16 (-0,38;0,07)
PO	74,95	-0,12 (-0,34;0,1)	5,28 (-8,76;19,32)	0,07 (-0,26;0,39)	-0,05 (-0,29;0,18)
PU	84,61	<b>-0,34 (-0,61;-0,08)</b>	15,01 (-1,35;31,38)	0,13 (-0,26;0,52)	-0,21 (-0,5;0,07)
<b>MP<sub>2,5</sub> (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>					
LC	27,13	-0,03 (-0,1;0,03)	0,81 (-3,12;4,74)	-0,06 (-0,15;0,02)	<b>-0,1 (-0,16;-0,04)</b>
LF	35,50	-0,04 (-0,15;0,08)	3,67 (-3,43;10,77)	-0,17 (-0,33;0,01)	<b>-0,2 (-0,31;-0,09)</b>
PO	37,76	-0,07 (-0,22;0,08)	2,62 (-6,23;11,46)	-0,11 (-0,31;0,1)	<b>-0,18 (-0,31;-0,04)</b>
PU	46,06	<b>-0,28 (-0,48;-0,07)</b>	9,58 (-0,47;19,64)	0,10 (-0,16;0,37)	<b>-0,17 (-0,34;-0,01)</b>
<b>O<sub>3</sub> (ppb)</b>					
BO	14,77	-0,01 (-0,07;0,06)	-0,25 (-4,3;3,8)	0,002 (-0,09;0,09)	-0,01 (-0,07;0,06)
CE	17,46	-0,01 (-0,08;0,06)	0,85 (-3,62;5,33)	-0,005 (-0,11;0,1)	-0,02 (-0,09;0,06)
CN	13,96	0,001 (-0,07;0,07)	-0,33 (-4,49;3,83)	0,01 (-0,09;0,11)	0,01 (-0,06;0,08)
IN	12,9	0,004 (-0,06;0,07)	-0,65 (-4,63;3,33)	-0,01 (-0,1;0,08)	-0,01 (-0,07;0,06)
LC	20,56	-0,04 (-0,14;0,06)	0,17 (-5,5;5,85)	0,03 (-0,1;0,17)	-0,01 (-0,1;0,08)
LF	16,77	-0,02 (-0,1;0,06)	1,7 (-2,84;6,25)	-0,03 (-0,14;0,07)	-0,05 (-0,13;0,02)
PO	17,58	-0,03 (-0,11;0,06)	-0,04 (-5,1;5,02)	0,02 (-0,1;0,13)	-0,01 (-0,09;0,07)
PU	16,19	-0,002 (-0,07;0,06)	-0,38 (-4,54;3,77)	-0,02 (-0,11;0,08)	-0,02 (-0,09;0,05)
<b>CO (ppm)</b>					
BO	1,22	-0,01 (-0,01;0,002)	0,12 (-0,31;0,56)	0,003 (-0,01;0,01)	-0,002 (-0,009;0,005)
CE	0,997	-0,01 (-0,01;0,001)	0,19 (-0,2;0,57)	0,01 (-0,004;0,02)	-0,0004 (-0,007;0,006)
CN	2,81	<b>-0,04 (-0,05;-0,02)</b>	<b>0,86 (0,27;1,45)</b>	<b>0,03 (0,02;0,05)</b>	-0,005 (-0,014;0,005)
IN	1,11	<b>-0,01 (-0,01;-0,001)</b>	0,11 (-0,24;0,46)	0,01 (-0,001;0,02)	0,001 (-0,005;0,006)
LC	0,79	<b>-0,004 (-0,01;-0,0003)</b>	0,03 (-0,16;0,21)	0,003 (-0,001;0,01)	-0,0003 (-0,003;0,003)
LF	1,23	-0,004 (-0,01;0,003)	0,13 (-0,26;0,53)	-0,0001 (-0,01;0,01)	-0,005 (-0,011;0,002)
PO	1,11	-0,005 (-0,01;0,01)	0,03 (-0,5;0,55)	0,003 (-0,01;0,02)	-0,001 (-0,008;0,006)
PU	1,08	-0,01 (-0,01;0,003)	0,23 (-0,24;0,7)	0,003 (-0,01;0,01)	-0,002 (-0,01;0,006)

Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU); en negritas valores significativos ( $p < 0,05$ )

**Tabla A 11. Coeficientes estimados de los modelos ajustados de STI para las medias mensuales de MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub>, O<sub>3</sub> y CO y sus intervalos de confianza del 95%.**

Modelo ajustado $\beta$ (IC95%)					
	Int B <sub>0</sub> (IC95%)	T B <sub>1</sub> (IC95%)	Xt B <sub>2</sub> (IC95%)	T*X B <sub>3</sub> (IC95%)	Tend (IC95%)
<b>MP<sub>10</sub> (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>					
BO	77,12	0,02 (-0,05;0,09)	-0,22 (-4,73;4,28)	<b>-0,14 (-0,25;-0,03)</b>	<b>-0,12 (-0,21;-0,03)</b>
CE	77,18	<b>-0,13 (-0,24;-0,011)</b>	2,77 (-3,32;8,86)	0,02 (-0,14;0,17)	<b>-0,11 (-0,21;-0,01)</b>
CN	105,39	<b>-0,43 (-0,77;-0,1)</b>	<b>5,92 (0,54;11,31)</b>	0,5 (-0,02;1,02)	<b>-0,14 (-0,27;-0,01)</b>
IN	67,02	0,063 (-0,06;0,19)	-4,57 (-12,58;3,44)	-0,16 (-0,33;0,01)	-0,09 (-0,21;0,02)
LC	53,44	-0,02 (-0,1;0,05)	<b>-7,46 (-12,67;-2,26)</b>	<b>0,17 (0,04;0,29)</b>	<b>0,14 (0,05;0,24)</b>
LF	77,67	-0,03 (-0,12;0,05)	0,32 (-5,38;6,03)	-0,04 (-0,15;0,07)	-0,08 (-0,16;0,01)
PO	72,19	-0,04 (-0,18;0,09)	-0,32 (-8,36;7,71)	0,07 (-0,09;0,23)	0,03 (-0,06;0,11)
PU	81,51	<b>-0,26 (-0,41;-0,1)</b>	<b>8,72 (1,36;16,09)</b>	0,13 (-0,06;0,31)	<b>-0,13 (-0,23;-0,02)</b>
<b>MP<sub>2,5</sub> (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>					
LC	26,39	-0,01 (-0,05;0,02)	-0,69 (-3,06;1,69)	<b>-0,06 (-0,12;-0,01)</b>	<b>-0,08 (-0,12;-0,04)</b>
LF	34,32	0,003 (-0,05;0,04)	1,29 (-2,18;4,76)	<b>-0,17 (-0,24;-0,09)</b>	<b>-0,17 (-0,23;-0,11)</b>
PO	36,42	-0,03 (-0,1;0,03)	-0,11 (-3,24;3,01)	<b>-0,11 (-0,19;-0,02)</b>	<b>-0,14 (-0,19;-0,09)</b>
PU	44,67	<b>-0,24 (-0,45;-0,03)</b>	<b>6,75 (0,48;13,03)</b>	0,10 (-0,11;0,31)	<b>-0,14 (-0,18;-0,09)</b>
<b>O<sub>3</sub> (ppb)</b>					
BO	15,18	<b>-0,02 (-0,03;-0,01)</b>	0,58 (-0,69;1,85)	0,002 (-0,03;0,03)	-0,02 (-0,04;0,01)
CE	17,96	<b>-0,03 (-0,04;-0,01)</b>	<b>1,88 (0,46;3,3)</b>	-0,005 (-0,04;0,03)	<b>-0,03 (-0,05;-0,01)</b>
CN	15,03	<b>-0,026 (-0,05;-0,01)</b>	1,00 (-0,4;2,39)	0,02 (-0,01;0,06)	0,003 (-0,03;0,02)
IN	13,38	-0,009 (-0,02;0,01)	0,32 (-0,54;1,18)	-0,01 (-0,03;0,01)	<b>-0,019 (-0,04;-0,01)</b>
LC	21,11	<b>-0,06 (-0,08;-0,03)</b>	1,27 (-0,15;2,7)	0,03 (-0,01;0,07)	<b>-0,022 (-0,04;-0,01)</b>
LF	17,24	<b>-0,03 (-0,06;-0,01)</b>	<b>2,64 (0,93;4,36)</b>	-0,03 (-0,07;0,01)	<b>-0,07 (-0,1;-0,04)</b>
PO	18,16	-0,05 (0,07;-0,03)	1,14 (-0,2;2,48)	0,02 (-0,01;0,05)	<b>-0,03 (-0,05;-0,01)</b>
PU	16,72	-0,017 (-0,04;0,01)	0,68 (-0,43;1,79)	-0,02 (-0,04;0,01)	<b>-0,03 (-0,05;-0,02)</b>
<b>CO (ppm)</b>					
BO	1,17	<b>-0,003 (-0,01;-0,002)</b>	0,01 (-0,09;0,11)	<b>0,003 (0,001;0,01)</b>	-0,001 (-0,003;0,002)
CE	0,949	<b>-0,005 (-0,01;-0,003)</b>	0,09 (-0,08;0,25)	<b>0,01 (0,002;0,01)</b>	0,0009 (-0,002;0,004)
CN	2,71	<b>-0,034 (-0,05;-0,02)</b>	<b>0,73 (0,22;1,25)</b>	<b>0,03 (0,01;0,05)</b>	-0,003 (-0,007;0,001)
IN	1,06	<b>-0,006 (-0,01;-0,003)</b>	0,01 (-0,11;0,12)	<b>0,01 (0,005;0,01)</b>	0,002 (-0,01;0,004)
LC	0,77	<b>-0,003 (-0,01;-0,0021)</b>	-0,02 (-0,07;0,04)	<b>0,003 (0,002;0,01)</b>	0,0003 (-0,001;0,001)
LF	1,18	<b>-0,003 (0,01;-0,002)</b>	0,02 (-0,1;0,14)	-0,0001 (-0,01;0,01)	<b>-0,003 (-0,006;0,01)</b>
PO	1,05	-0,003 (-0,01;0,01)	-0,09 (-0,33;0,15)	0,003 (-0,01;0,01)	0,003 (-0,003;0,004)
PU	1,02	<b>-0,003 (-0,01;-0,001)</b>	0,1 (-0,02;0,22)	0,003 (-0,01;0,01)	0,003 (-0,002;0,002)

Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cero Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU); en negritas valores significativos ( $p < 0.05$ )

**Tabla A 12. Coeficientes estimados de los modelos basales de STI para los máximos mensuales de MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub>, O<sub>3</sub> y CO y sus intervalos de confianza del 95%.**

<b>Modelo basal <math>\beta</math> (IC95%)</b>					
	<b>Int</b> <b>B<sub>0</sub> (IC95%)</b>	<b>T</b> <b>B<sub>1</sub> (IC95%)</b>	<b>X<sub>t</sub></b> <b>B<sub>2</sub> (IC95%)</b>	<b>T*X</b> <b>B<sub>3</sub> (IC95%)</b>	<b>Tend (IC95%)</b>
<b>MP<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>					
BO	136,82	-0,04 (-0,64;0,56)	1,68 (-33,82;37,19)	-0,30 (-1,12;0,52)	-0,334 (-0,893;0,224)
CE	150,61	<b>-0,45 (-0,89;-0,01)</b>	9,71 (-20,43;39,84)	0,17 (-0,52;0,86)	-0,279 (-0,808;0,251)
CN	181,21	<b>-0,95 (-1,57;-0,32)</b>	34,31 (-5,91;74,53)	0,58 (-0,38;1,55)	-0,364 (-1,1;0,372)
IN	116,86	0,04 (-0,46;0,54)	-9,75 (-38,94;19,44)	-0,18 (-0,88;0,52)	-0,141 (-0,627;0,346)
LC	96,30	-0,2 (-0,42;0,03)	-11,82 (-23,73;0,09)	<b>0,46 (0,17;0,75)</b>	<b>0,258 (0,078;0,439)</b>
LF	133,19	-0,16 (-0,63;0,3)	7,62 (-23,01;38,25)	-0,09 (-0,8;0,61)	-0,254 (-0,785;0,277)
PO	136,70	-0,26 (-0,85;0,33)	7,81 (-27,27;42,89)	0,16 (-0,68;1,0)	-0,103 (-0,698;0,491)
PU	157,03	-0,68 (-1,27;-0,08)	30,25 (-6,92;67,42)	0,36 (-0,55;1,27)	-0,316 (-1,0;0,367)
<b>MP<sub>2,5</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>					
LC	52,19	-0,14 (-0,34;0,05)	1,17 (-8,91;11,24)	-0,01 (-0,26;0,23)	<b>-0,158 (-0,311;-0,005)</b>
LF	60,48	-0,03 (-0,3;0,23)	2,59 (-12,76;17,94)	-0,28 (-0,64;0,08)	<b>-0,313 (-0,551;-0,074)</b>
PO	70,00	-0,13 (-0,5;0,24)	-0,69 (-19,55;18,17)	-0,1 (-0,58;0,37)	-0,231 (-0,525;0,064)
PU	75,53	-0,21 (-0,55;0,12)	4,56 (-16,69;25,8)	0,04 (-0,46;0,54)	-0,172 (-0,548;0,204)
<b>O<sub>3</sub> (ppb)</b>					
BO	16,70	-0,01 (-0,08;0,06)	-0,54 (-4,82;3,75)	0,003 (-0,1;0,1)	-0,005 (-0,077;0,066)
CE	19,69	-0,02 (-0,09;0,06)	0,87 (-3,79;5,53)	-0,002 (-0,11;0,1)	-0,018 (-0,095;0,059)
CN	15,48	0,004 (-0,07;0,08)	-0,46 (-4,87;3,95)	0,007 (-0,1;0,11)	0,011 (-0,067;0,089)
IN	14,93	-0,0003 (-0,07;0,07)	-0,61 (-4,86;3,64)	-0,006 (-0,11;0,09)	-0,007 (-0,075;0,062)
LC	23,35	-0,04 (-0,15;0,06)	0,08 (-5,9;6,07)	0,03 (-0,11;0,17)	-0,013 (-0,108;0,083)
LF	19,00	-0,02 (-0,1;0,06)	1,77 (-3,01;6,54)	-0,04 (-0,15;0,07)	-0,061 (-0,135;0,013)
PO	19,85	-0,03 (-0,12;0,05)	0,07 (-5,23;5,37)	0,02 (-0,1;0,14)	-0,015 (-0,099;0,068)
PU	18,14	-0,004 (-0,07;0,06)	-0,49 (-4,87;3,89)	-0,02 (-0,12;0,08)	-0,02 (-0,094;0,054)
<b>CO (ppm)</b>					
BO	1,46	-0,01 (-0,01;0,003)	0,14 (-0,38;0,66)	0,003 (-0,01;0,02)	-0,003 (-0,011;0,006)
CE	1,23	-0,01 (-0,02;0,001)	0,19 (-0,27;0,66)	0,01 (-0,005;0,02)	-0,001 (-0,008;0,006)
CN	3,12	<b>-0,04 (-0,05;-0,03)</b>	<b>0,95 (0,23;1,66)</b>	<b>0,03 (0,01;0,05)</b>	-0,007 (-0,018;0,005)
IN	1,33	<b>-0,01 (-0,02;-0,001)</b>	0,13 (-0,28;0,55)	0,01 (-0,002;0,02)	0,001 (-0,007;0,007)
LC	0,90	<b>-0,004 (-0,01;-0,0002)</b>	0,03 (-0,19;0,25)	0,003 (-0,002;0,01)	-0,001 (-0,004;0,003)
LF	1,43	-0,01 (-0,01;0,003)	0,14 (-0,31;0,59)	-0,0002 (-0,011;0,01)	-0,005 (-0,012;0,001)
PO	1,40	-0,01 (-0,02;0,005)	0,1 (-0,5;0,69)	0,004 (-0,01;0,018)	-0,003 (-0,011;0,006)
PU	1,36	-0,01 (-0,02;0,003)	0,31 (-0,27;0,9)	0,003 (-0,011;0,017)	-0,004 (-0,014;0,007)

Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cero Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU); en negritas valores significativos (p<0.05)

**Tabla A 13. Coeficientes estimados de los modelos ajustados de STI para los máximos mensuales de MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub>, O<sub>3</sub> y CO y sus intervalos de confianza del 95%.**

<b>Modelo ajustado β (IC95%)</b>					
	<b>Int</b> <b>B<sub>0</sub> (IC95%)</b>	<b>T</b> <b>B<sub>1</sub> (IC95%)</b>	<b>Xt</b> <b>B<sub>2</sub> (IC95%)</b>	<b>T*X</b> <b>B<sub>3</sub> (IC95%)</b>	<b>Tend (IC95%)</b>
<b>MP<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>					
BO	131,00	0,13 (-0,2;0,45)	-10,12 (-28,06;7,82)	-0,30 (-0,71;0,12)	-0,17 (-0,423;0,083)
CE	146,22	<b>-0,33 (-0,59;-0,06)</b>	0,81 (-16,28;17,9)	0,17 (-0,24;0,58)	-0,155 (-0,464;0,153)
CN	171,77	<b>-0,7 (-1,03;-0,36)</b>	<b>19,14 (7,58;30,69)</b>	<b>0,52 (0,11;0,93)</b>	-0,174 (-0,42;0,072)
IN	112,39	0,17 (-0,1;0,43)	<b>-18,82 (-36,61;-1,04)</b>	-0,18 (-0,59;0,23)	-0,015 (-0,328;0,298)
LC	93,90	-0,13 (-0,3;0,04)	<b>-16,69 (-24,93;-8,45)</b>	<b>0,46 (0,24;0,68)</b>	<b>0,326 (0,189;0,462)</b>
LF	128,04	-0,02 (-0,25;0,21)	-2,83 (-18,69;13,03)	-0,09 (-0,44;0,26)	-0,109 (-0,375;0,157)
PO	131,00	-0,1 (-0,37;0,17)	-3,77 (-21,01;13,48)	0,16 (-0,25;0,56)	0,057 (-0,24;0,355)
PU	150,68	<b>-0,5 (-0,78;-0,22)</b>	<b>17,37 (1,52;33,22)</b>	0,36 (-0,02;0,74)	-0,137 (-0,403;0,128)
<b>MP<sub>2,5</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>					
LC	50,87	-0,11 (-0,24;0,02)	-1,51 (-9,33;6,3)	-0,01 (-0,21;0,18)	-0,121 (-0,262;0,021)
LF	58,54	0,02 (-0,08;0,13)	-1,35 (-7,88;5,18)	<b>-0,28 (-0,45;-0,11)</b>	<b>-0,258 (-0,391;-0,124)</b>
PO	67,48	-0,05 (-0,24;0,13)	-5,82 (-14,64;3)	-0,1 (-0,36;0,15)	-0,16 (-0,329;0,009)
PU	72,33	-0,12 (-0,4;0,15)	-1,93 (-13,02;9,16)	0,04 (-0,28;0,37)	-0,082 (-0,264;0,1)
<b>O<sub>3</sub> (ppb)</b>					
BO	17,11	<b>-0,02 (-0,04;-0,01)</b>	0,29 (-1,09;1,68)	0,003 (-0,03;0,03)	-0,017 (-0,042;0,008)
CE	20,17	<b>-0,03 (-0,05;-0,01)</b>	<b>1,84 (0,46;3,23)</b>	-0,002 (-0,03;0,03)	<b>-0,031 (-0,054;-0,009)</b>
CN	16,58	-0,023 (-0,05;0,01)	0,86 (-0,64;2,37)	0,02 (-0,02;0,06)	-0,003 (-0,032;0,027)
IN	15,42	-0,0138 (-0,03;0,01)	0,37 (-0,58;1,32)	-0,01 (-0,03;0,02)	<b>-0,02 (-0,038;-0,003)</b>
LC	23,87	<b>-0,06 (-0,09;-0,03)</b>	1,14 (-0,69;2,97)	0,03 (-0,01;0,07)	<b>-0,027 (-0,048;-0,006)</b>
LF	19,46	<b>-0,04 (-0,07;-0,01)</b>	<b>2,69 (0,92;4,46)</b>	-0,04 (-0,08;0,01)	<b>-0,074 (-0,102;-0,046)</b>
PO	20,41	<b>-0,05 (-0,07;-0,03)</b>	1,19 (-0,13;2,51)	0,02 (-0,01;0,05)	<b>-0,031 (-0,05;-0,012)</b>
PU	18,66	-0,019 (-0,04;-0,01)	0,56 (-0,53;1,65)	-0,02 (-0,04;0,01)	<b>-0,035 (-0,053;-0,017)</b>
<b>CO (ppm)</b>					
BO	1,40	<b>-0,004 (-0,01;-0,003)</b>	0,01 (-0,11;0,13)	0,003 (-0,01;0,01)	-0,001 (-0,004;0,001)
CE	1,17	<b>-0,006 (-0,01;-0,003)</b>	0,08 (-0,09;0,25)	<b>0,01 (0,002;0,01)</b>	0,001 (-0,003;0,004)
CN	3,00	<b>-0,035 (-0,05;-0,02)</b>	<b>0,78 (0,28;1,29)</b>	<b>0,03 (0,01;0,05)</b>	<b>-0,005 (-0,009;-0,001)</b>
IN	1,27	<b>-0,007 (-0,01;-0,004)</b>	0,02 (-0,11;0,15)	<b>0,01 (0,005;0,01)</b>	0,0016 (-0,001;0,004)
LC	0,88	<b>-0,003 (-0,01;-0,0024)</b>	-0,02 (-0,08;0,05)	<b>0,003 (0,002;0,01)</b>	0,000 (-0,001;0,001)
LF	1,37	<b>-0,004 (-0,01;-0,002)</b>	0,02 (-0,11;0,15)	-0,0002 (-0,003;0,003)	<b>-0,004 (-0,007;-0,001)</b>
PO	1,33	<b>-0,005 (-0,01;-0,001)</b>	-0,04 (-0,26;0,19)	0,004 (-0,001;0,01)	-0,001 (-0,005;0,003)
PU	1,28	<b>-0,005 (-0,01;-0,002)</b>	<b>0,16 (0,01;0,32)</b>	0,003 (-0,01;0,007)	-0,002 (-0,004;0,001)

Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU); en negritas valores significativos (p<0.05)



**Tabla A 14. Descripción de los indicadores y variables de contexto social según comuna de ubicación de la estación de monitoreo.**

	CN	BO	IN	CE	PU	LF	PO	LC	Año	Fuente
Categoría de prioridad social	Alta prioridad	Media-alta prioridad	Media-alta prioridad	Media-alta prioridad	Media-alta prioridad	Media-baja prioridad	Media-baja prioridad	Sin prioridad	2007-2014	
Índice de prioridad social (Puntaje)	74	65	56	52	46	42	40	8	2007	MIDESO
Índice de prioridad social (Puntaje)	69	62	58	56	58	48	48	11	2014	
<b>Variables DEMOGRAFICAS</b>										
Proyección de población	155372	186678	73121	77925	213469	381946	258186	267873	2007	INE
Densidad población (hab./Ha)	122,3	120,4	70,9	31,8	13,3	56,3	74,8	28,8	2002	INE
Población < 14 años (%)	12,3	11,8	8,7	11,1	13,1	11,0	7,1	8,7	2007	INE
Población > 65 años (%)	7,3	7,6	14,9	8,7	5,1	6,5	12,4	11,6	2007	INE
Índice de masculinidad	0,98	0,98	0,89	0,96	0,98	0,94	0,99	0,81	2007	INE
Población urbana (%)	100	100	100	100	98,3	99,8	100	100	2002	INE
Índice de desarrollo humano	0,683	0,711	0,709	0,743	0,735	0,773	0,807	0,933	2006	MIDESO
Hacinamiento (%)	17,8	13,5	18,3	8,6	11,2	11,5	13,1	1,6	2013	Encuesta CASEN
<b>Variables SOCIOECONÓMICAS</b>										
Hogares. Número total	38719	45155	19072	19521	50158	9898	71481	74599	2002	Datos municipales
Hogares con nivel de pobreza (%)	19,8	16,0	13,7	15,1	17,3	12,1	12,3	2,3	2011	Encuesta CASEN
Hogares con nivel de pobreza (%)	17,5	15,8	6,1	8,3	7,1	9,6	7,3	2,3	2006	Encuesta CASEN
Ingreso per cápita mensual (miles \$)	416	470	615	672	598	903	866	2047	2006	Encuesta CASEN
Ingreso per cápita mensual (miles \$)	531	644	502	717	682	1013	1279	2275	2013	Encuesta CASEN
<b>Variables de EDUCACION</b>										
Años estudio total (promedio)	8,8	9,5	10,6	9,9	9,6	10,9	11,9	13,4	2002	Datos municipales
Años estudio total (promedio)	9,9	10,1	10,8	10,7	10,9	11,9	13,9	14,8	2013	Datos municipales
Pob. con título técnico (%)	3,5	5,6	9,4	6,6	5,5	9,1	10,8	9,1	2002	Datos municipales
Pob. con título universitario (%)	2,8	5,4	11,8	7,4	4,5	12,8	22,1	39,2	2002	Datos municipales
<b>Variables de ETNIA</b>										
Pob. perteneciente grupo étnico (%)	6,6	3,6	1,8	3,2	4,5	3,2	2,7	1,3	2002	INE
Pob. perteneciente grupo étnico (%)	9,5	10,7	0,5	5,1	6,8	6,1	7	1,4	2013	Encuesta CASEN
<b>Variables de SALUD</b>										
AVPP total (por 1000 hab.)	91,0	78,6	141,9	81,4	63,6	58,8	92,4	46,4	2005	DEIS
AVPP total (por 1000 hab.)	93,4	86,4	194,6	83,5	56,5	60,9	107,2	44,1	2010	DEIS
Tasa mortalidad <1 año (por 1000 NV)	7,5	9,1	13,8	4,8	5,1	6,9	5,8	4,2	2011	DEIS

MIDESO: Ministerio de Desarrollo Social y Familia; INE: Instituto Nacional de Estadísticas; DEIS: Departamento de Estadísticas e Información en Salud. Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU)

**Tabla A 15. Tasa de motorización (vehículos/habitante) entre los años 2002 y 2012, según comuna de ubicación de la estación de monitoreo.**

	2001	2002	2007	2008	2009	2010	2011	2012
<b>CE</b>	0,285	0,325	0,372	0,400	0,399	0,449	0,460	0,464
<b>CN</b>	0,064	0,072	0,081	0,100	0,096	0,097	0,097	0,106
<b>BO</b>	0,056	0,076	0,090	0,107	0,114	0,126	0,104	0,143
<b>IN</b>	0,172	0,251	0,378	0,402	0,407	0,443	0,395	0,394
<b>LF</b>	0,090	0,095	0,122	0,132	0,134	0,135	0,142	0,164
<b>LC</b>	0,288	0,275	0,299	0,306	0,323	0,322	0,319	0,337
<b>PU</b>	0,073	0,077	0,063	0,083	0,082	0,080	0,087	0,095
<b>PO</b>	0,311	0,320	0,337	0,348	0,361	0,403	0,448	0,444

Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU)

**Tabla A 16. Número total de empresas y proporción de empresas con fuentes fijas de emisión según comunas para los años 2005 y 2010.**

	2005			2010			Diferencia a 2010- 2005
	Total empresas	Fuentes fijas	% Fuentes fijas	Total empresas	Fuentes fijas	% Fuentes fijas	
<b>CE</b>	3132	514	16.4	3400	659	19,4	<b>3,0</b>
<b>CN</b>	4167	467	11.2	4066	505	12,4	1,2
<b>BO</b>	5424	645	11.9	5422	786	14,5	2,6
<b>IN</b>	4557	788	17.3	4722	866	18,3	1,0
<b>LF</b>	14130	1303	9.2	15042	1774	11,8	2,6
<b>LC</b>	34175	2624	7.7	43152	3371	7,8	<b>0,1</b>
<b>PU</b>	6448	741	11.5	7264	964	13,3	1,8
<b>PO</b>	49488	6198	12.5	52507	6684	12,7	0,2

Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU)

**Tabla A 17. Resultados del test Kruskal-Wallis para las concentraciones de MP<sub>10</sub> pre y post intervención.**

	BO	CE	CN	IN	LC	LF	PO	PU
<b>Período pre intervención</b>								
BO								
CE	0,0001							
CN	0,0001	0,0001						
IN	0,0001	0,0006	0,0001					
LC	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001				
LF	0,9615	0,0001	0,2792	0,0001	0,0001			
PO	0,0001	0,0003	0,0001	0,5635	0,0001	0,0001		
PU	0,0001	0,0064	0,0001	0,9442	0,0001	0,0001	0,5718	
<b>Período post intervención</b>								
BO								
CE	0,0001							
CN	0,0001	0,0899						
IN	0,0001	0,0001	0,0917					
LC	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001				
LF	0,3830	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001			
PO	0,0001	0,0011	0,0001	0,0001	0,0001	0,0006		
PU	0,0001	0,0001	0,0013	0,0690	0,0001	0,0001	0,0001	

Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU)

**Tabla A 18. Resultados del test Kruskal-Wallis para las concentraciones de MP<sub>2,5</sub> pre y post intervención.**

	LC	LF	PO	PU
<b>Período pre intervención</b>				
LC				
LF	0,0001			
PO	0,0001	0,0258		
PU	0,0001	0,0001	0,0209	
<b>Período post intervención</b>				
LC				
LF	0,0001			
PO	0,0001	0,0237		
PU	0,0001	0,0001	0,0001	

Estaciones: El Bosque (BO), Cerrillos (CE), Cerro Navia (CN), Independencia (IN), Las Condes (LC), La Florida (LF), Parque O'Higgins (PO) y Pudahuel (PU)