



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ÁNALISIS DE LA EXPOSICIÓN A MATERIAL PARTICULADO FINO UTILIZANDO
DATOS PASIVOS DE TRANSPORTE PÚBLICO

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN TRANSPORTE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

BENJAMÍN ROBERTO TREWHELA SÁEZ

PROFESORES GUÍA:
NICOLÁS JORGE HUNEEUS LAGOS
MARCELA ADRIANA MUNIZAGA MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ALEJANDRO TIRACHINI HERNÁNDEZ
KARINA VÉLIZ ROJAS

SANTIAGO DE CHILE
2018

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR
AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN TRANSPORTE
Y AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: BENJAMÍN ROBERTO TREWHELA SÁEZ
FECHA: 2018
PROFESORES GUÍA: NICOLÁS JORGE HUNEEUS LAGOS
MARCELA ADRIANA MUNIZAGA MUÑOZ**

ÁNÁLISIS DE LA EXPOSICIÓN A MATERIAL PARTICULADO FINO UTILIZANDO DATOS PASIVOS DE TRANSPORTE PÚBLICO

La exposición a contaminantes atmosféricos es un tema relevante producto de los impactos que genera, tanto en la salud humana como el medioambiente, especialmente en los períodos invernales. Esta investigación tiene como finalidad estimar la exposición a material particulado de diámetro 2,5 o menor ($MP_{2,5}$) de los usuarios frecuentes de transporte público combinando bases de datos de movilidad y de contaminación atmosférica.

La movilidad de la población se estima con datos de la operación del sistema de transporte público de Santiago de Chile para la semana laboral del 20 al 24 de julio de 2015. Esta información proviene de la ubicación de los buses en ruta por pulsos GPS y las transacciones de pago de los usuarios con tarjetas inteligentes. Con información del viaje sobre el paradero de bajada, propósito (hogar, trabajo, estudio, otros) y comuna de residencia, se construye la trayectoria de 105.588 usuarios, equivalente al 1,7% de la población de Santiago.

La metodología se basa en asignar la posición de los usuarios a la posición de los paraderos de transporte público visitados durante sus viajes y en estimar el tiempo de exposición como el tiempo que gasta el usuario en actividades. El análisis de la exposición se realiza comparando los resultados de la aplicación del método a dos bases de datos distintas: las mediciones de las once estaciones de monitoreo de Santiago y las salidas del modelo CHIMERE cada 2 [km].

Los resultados muestran que la exposición promedio diaria en el período es de 44, 75, 73, 73 y 67 [$\mu g/m^3$] con estaciones de monitoreo y de 45, 72, 69, 89 y 82 [$\mu g/m^3$] con CHIMERE. El 91% de la exposición se concentra en las actividades trabajo/estudio y hogar en trabajadores/estudiantes para ambas bases de datos. CHIMERE muestra una mayor concentración de $MP_{2,5}$ en los lugares de trabajo/estudio y menor en los hogares que lo observado por las estaciones. Los resultados con estaciones muestran una baja variabilidad de la exposición que no es realista para residentes de comunas de gran superficie, por lo que la distribución actual de la red de monitoreo es insuficiente para estimar la variabilidad espacial de la exposición.

El método presentado tiene la capacidad de estimar la cantidad de personas afectadas por los niveles de $MP_{2,5}$ establecidos por la norma primaria de calidad del aire y tiene el potencial de evaluar políticas medioambientales. Se sugiere la inclusión de factores para capturar la variabilidad de las concentraciones a nivel de sub-grilla en CHIMERE (Valari and Menut, 2010) para mejorar la estimación de la exposición. A modo de perspectiva futura, se puede extender el análisis vinculando los resultados con mortalidad y consultas hospitalarias por comuna, incorporando otros tipos de usuarios más vulnerables y ampliando el método a otros contaminantes y horizontes temporales.

A mis padres

Agradecimientos

Al concluir este trabajo siento la necesidad de entregar mis más sinceros agradecimientos a la profesora Marcela Munizaga y al profesor Nicolás Huneus por darme la oportunidad de trabajar en este tema, por su ayuda, sus conocimientos, entusiasmo, optimismo y constante apoyo en la ejecución de esta tesis y en la participación de eventos para mejorar mi desarrollo como profesional.

Reciban también mi reconocimiento las otras personas que han colaborado directamente, especialmente el profesor Alejandro Tirachini y la profesora Karina Véliz por sus valiosos comentarios, observaciones e interés en este trabajo. También quiero agradecer a Andrea Mazzeo por el tiempo dedicado a enseñarme el modelo CHIMERE y facilitarme las salidas utilizadas en este trabajo. A la profesora Laura Gallardo por darme la oportunidad de extender mis conocimientos al otro lado del mundo. Y a Raul por la paciencia de contestar cada pregunta de programación en Python y SQL para el manejo de las bases de datos utilizadas.

Finalmente, quiero agradecer a todas las personas que colaboraron de forma indirecta en el término de esta etapa. En primer lugar, a mi madre y padre quienes construyeron un ambiente óptimo para mi desarrollo personal y profesional. A KJ por darme oportunidades laborales y la estabilidad necesaria para concentrarme en terminar esta tesis. A La Esquina, Civiles y Transpostres por llenar la vida universitaria de risas y buenos momentos. Y a la oficina 519 con quienes compartí la mayor parte del último proceso universitario y que espero seguir compartiendo el resto de la carrera profesional.

Tabla de Contenido

Índice de Tablas	vi
Índice de Ilustraciones	viii
1. Introducción	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Objetivo general	3
1.1.2. Objetivos específicos	3
2. Revisión bibliográfica	4
2.1. Métodos de estimación de concentración de contaminantes atmosféricos	4
2.2. Métodos de estimación de movilidad y uso de tiempo	5
2.3. Métodos de estimación de exposición a contaminantes atmosféricos	7
3. Descripción de datos	9
3.1. Datos de contaminación atmosférica en Santiago	12
3.2. Datos de transporte público y movilidad en Santiago	16
3.3. Metodología	32
4. Resultados	36
4.1. Exposición calculada con datos de la red de monitoreo de calidad de aire de Santiago	37
4.2. Exposición calculada con datos de CHIMERE	53
5. Discusión	67
5.1. Análisis de resultados entre bases de datos	67
5.2. Supuestos y consideraciones	69
5.3. Evaluar políticas públicas medioambientales	70
5.4. Trabajar desde el hogar	71
6. Conclusiones y recomendaciones	76
6.1. Conclusiones finales	76
6.2. Recomendaciones, consideraciones y trabajo a futuro	80
Bibliografía	82
A. Anexos	87

Índice de Tablas

3.1. Ingreso monetario promedio mensual del hogar por comuna. <i>Fuente: MDS (2015)</i>	11
3.2. Resumen estadístico de concentraciones de $MP_{2,5}$ medidas en estaciones de monitoreo desde el 20 al 24 de julio de 2015.	13
3.3. Distribución de usuarios por comuna de residencia. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	21
3.4. Ejemplo matriz de etapas de viajes. <i>Fuente: ADATRAP (Gschwender et al., 2016)</i>	22
3.5. Secuencia de paraderos visitados por el usuario 1 durante el primer viaje. <i>Fuente: ADATRAP (Gschwender et al., 2016)</i>	23
3.6. Horas promedio y desviación estándar dedicadas a actividades por la comuna de residencia de trabajadores.	29
3.7. Horas promedio y desviación estándar dedicadas a actividades por la comuna de residencia de estudiantes.	30
4.1. Porcentaje de usuarios expuestos a los niveles establecidos por la norma primaria de calidad de aire para $MP_{2,5}$ calculado con datos de estaciones de monitoreo	40
4.2. Resumen de la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ con datos de estaciones de monitoreo.	42
4.3. Resumen estadístico de la exposición promedio semanal a $MP_{2,5}$ con datos de estaciones de monitoreo.	43
4.4. Parámetros de la regresión aplicado al ingreso con datos de estaciones de monitoreo	49
4.5. Parámetros de la regresión aplicado al IDSE con datos de estaciones de monitoreo	49
4.6. Exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ [$\mu g/m^3$] con datos de estaciones de monitoreo	50
4.7. Distancia promedio diaria entre usuario y estación de monitoreo agrupado por comuna de residencia (23 de julio de 2015)	52
4.8. Exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ calculada con datos de estaciones de monitoreo (EM), con CHIMERE y con observaciones sintéticas simuladas por CHIMERE en la posición de las estaciones (EM CHIMERE)	56
4.9. Porcentaje de usuarios expuestos a los niveles establecidos por la norma primaria de calidad de aire para $MP_{2,5}$ calculado con datos de CHIMERE	57
4.10. Porcentaje de exposición por actividad, tipo de usuario y base de datos utilizada.	58
4.11. Parámetros de la regresión aplicado al ingreso con datos de CHIMERE	66
4.12. Parámetros de la regresión aplicado al IDSE con datos de CHIMERE	66

5.1. Residentes beneficiados por trabajar desde el hogar (23 de julio de 2015) . .	73
5.2. Residentes perjudicados por trabajar desde el hogar (23 de julio de 2015) . .	73
5.3. Residentes beneficiados por permanecer en el hogar (23 de julio de 2015) . .	75
5.4. Residentes perjudicados por permanecer en el hogar (23 de julio de 2015) . .	75
A.1. Distribución de habitantes de Santiago en 34 comunas. <i>Fuente: (INE, 2017)</i>	88
A.2. Diccionario comunas.	89
A.3. Matriz Origen-Destino de usuarios que viajan desde comuna de residencia hacia comuna de trabajo.	90
A.4. Matriz Origen-Destino de usuarios que viajan desde comuna de residencia hacia comuna de estudio.	91
A.5. Comunas de Santiago según el índice de desarrollo socioeconómico (IDSE) del año 2014. <i>Fuente: Gattini et al. (2014)</i>	93
A.6. Parámetros de la regresión aplicado al ingreso (\$600.000 - \$1.500.000) con datos de estaciones de monitoreo	94
A.7. Parámetros de la regresión aplicado al ingreso (\$1.500.000 - \$4.500.000) con datos de estaciones de monitoreo	94
A.8. Parámetros de la regresión aplicado al ingreso (\$600.000 - \$1.500.000) con datos de CHIMERE	95
A.9. Parámetros de la regresión aplicado al ingreso (\$1.500.000 - \$4.500.000) con datos de CHIMERE	95
A.10.Exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ de los usuarios agrupado por comuna de residencia con datos de estaciones de monitoreo (20 de julio de 2015)	96
A.11.Exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ de los usuarios agrupado por comuna de residencia con datos de estaciones de monitoreo (21 de julio de 2015)	97
A.12.Exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ de los usuarios agrupado por comuna de residencia con datos de estaciones de monitoreo (22 de julio de 2015)	98
A.13.Exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ de los usuarios agrupado por comuna de residencia con datos de estaciones de monitoreo (23 de julio de 2015)	99
A.14.Exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ de los usuarios agrupado por comuna de residencia con datos de estaciones de monitoreo (24 de julio de 2015)	100
A.15.Exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ de los usuarios agrupado por comuna de residencia con datos de CHIMERE (20 de julio de 2015)	101
A.16.Exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ de los usuarios agrupado por comuna de residencia con datos de CHIMERE (21 de julio de 2015)	102
A.17.Exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ de los usuarios agrupado por comuna de residencia con datos de CHIMERE (22 de julio de 2015)	103
A.18.Exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ de los usuarios agrupado por comuna de residencia con datos de CHIMERE (23 de julio de 2015)	104
A.19.Exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ de los usuarios agrupado por comuna de residencia con datos de CHIMERE (24 de julio de 2015)	105
A.20.Porcentaje de exposición que aporta cada actividad en la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ en trabajadores con datos de CHIMERE	113
A.21.Porcentaje de exposición que aporta cada actividad en la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ en estudiantes con datos de CHIMERE	114

Índice de Ilustraciones

3.1. Localización de las once estaciones de monitoreo de calidad de aire (círculos rosados): Cerrillos (a), Cerro Navia (b), El Bosque (c), Independencia (d), La Florida (e), Las Condes (f), Pudahuel (g), Puente Alto (h), Quilicura (i), Parque O'Higgins (j) y Talagante (k). La estación Talagante se encuentra fuera del área de estudio a una distancia mayor que la representada en la figura. Además, se muestra el ingreso monetario mensual de los hogares de las comunas de Santiago de mayor (rojo) a menor (azul) [USD/año-2015]. <i>Fuente: Elaboración propia con datos de MDS (2015) y http://sinca.mma.gob.cl/</i>	10
3.2. Registro horario de MP _{2,5} de la red de monitoreo de calidad de aire en Santiago desde el 20 al 24 de julio de 2015. La medianoche empieza en la etiqueta del día respectivo. <i>Fuente: Elaboración propia con datos de http://sinca.mma.gob.cl/</i>	12
3.3. Simulación de las concentraciones de MP _{2,5} en Santiago para el día 20 de julio de 2015 a las 7:00 a.m. Las concentraciones están coloreadas de manera continua de más alta (rojo) a más baja concentración (azul). <i>Fuente: Mazzeo et al. (2018)</i>	15
3.4. Mapa de recorridos de Transantiago. <i>Fuente: http://www.transantiago.cl/</i>	17
3.5. Red de Metro de Santiago. <i>Fuente: https://www.metro.cl/</i>	18
3.6. Diagrama de flujo ilustrando el procesamiento de datos de smart cards. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	20
3.7. Ruta del primer viaje del usuario 1 en transporte público desde el hogar en Las Condes al trabajo en la comuna de Santiago (ver Tabla 3.4) <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	22
3.8. Histograma de los viajes de la muestra. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	24
3.9. Histograma de las etapas de los viajes de la muestra. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	24
3.10. Distribución espacial de actividad hogar a las 4:00 a.m. (azul). La oscuridad del color refleja una mayor densidad de usuarios detectados en las cercanías de los paraderos de buses. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	25
3.11. Distribución espacial de actividad trabajo a las 2:00 p.m. (rojo). La oscuridad del color refleja una mayor densidad de usuarios detectados en las cercanías de los paraderos de buses. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	26
3.12. Distribución espacial de actividad estudio 2:00 p.m. (café). La oscuridad del color refleja una mayor densidad de usuarios detectados en las cercanías de los paraderos de buses. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	26
3.13. Histograma de uso de tiempo dedicado a actividad hogar. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	27

3.14.	Histograma de uso de tiempo dedicado a actividad trabajo. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	27
3.15.	Histograma de uso de tiempo dedicado a actividad estudio. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	28
3.16.	Histograma de uso de tiempo dedicado a actividad otros. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	28
3.17.	Histograma de uso de tiempo dedicado a actividad viaje. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	28
3.18.	Uso de tiempo por actividad en función del tiempo (20 de julio de 2015). <i>Fuente: Elaboración propia</i>	31
3.19.	Aplicación de la metodología a datos de CHIMERE para estimar la exposición de un usuario i que visita tres paraderos de buses durante un viaje para realizar una actividad en el paradero (3). La trayectoria del viaje se representa con una línea negra sólida, mientras que los valores de las concentraciones son representados por círculos verdes. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	33
3.20.	Aplicación de la metodología a datos de estaciones de monitoreo para estimar la exposición de un usuario i que visita tres paraderos de buses durante un viaje para realizar una actividad en el paradero (3). La trayectoria del viaje se representa con una línea negra sólida, mientras que la estación de monitoreo es representada con un cuadrado azul. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	34
4.1.	Exposición a $MP_{2,5}$ en un día calculada con el modelo para el usuario de la Tabla 3.4 (Hogar: Las Condes; Trabajo: Santiago). Actividades etiquetadas con símbolos: hogar (casa), trabajo (herramienta) y viaje (bus). Color representa magnitud de concentración de más alta (roja) a más baja (verde).	36
4.2.	Porcentaje de usuarios expuestos a $MP_{2,5}$ durante intervalos horarios desde el 20 al 24 de julio de 2015 con datos de estaciones de monitoreo. La medianoche se presenta en la posición de la etiqueta del día.	37
4.3.	Histogramas de usuarios expuestos a $MP_{2,5}$ con datos de estaciones de monitoreo	39
4.4.	Porcentaje de exposición que aporta cada actividad en la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ en trabajadores con datos de estaciones de monitoreo.	41
4.5.	Porcentaje de exposición que aporta cada actividad en la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ en estudiantes con datos de estaciones de monitoreo.	41
4.6.	Distribución de la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ agrupado por comuna de residencia (20 de julio de 2015) con datos de estaciones de monitoreo. Líneas representan la cota inferior para declarar episodio Regular ($50 [\mu g/m^3]$), Alerta ($80 [\mu g/m^3]$), Preemergencia ($110 [\mu g/m^3]$) y Emergencia ($170 [\mu g/m^3]$). Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja son el promedio y la mediana respectivamente	44
4.7.	Distribución de la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ agrupado por comuna de residencia (21 de julio de 2015) con datos de estaciones de monitoreo. Líneas representan la cota inferior para declarar episodio Regular ($50 [\mu g/m^3]$), Alerta ($80 [\mu g/m^3]$), Preemergencia ($110 [\mu g/m^3]$) y Emergencia ($170 [\mu g/m^3]$). Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja son el promedio y la mediana respectivamente	45

4.8. Distribución de la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ agrupado por comuna de residencia (22 de julio de 2015) con datos de estaciones de monitoreo. Líneas representan la cota inferior para declarar episodio Regular ($50 [\mu g/m^3]$), Alerta ($80 [\mu g/m^3]$), Preemergencia ($110 [\mu g/m^3]$) y Emergencia ($170 [\mu g/m^3]$). Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja son el promedio y la mediana respectivamente	46
4.9. Distribución de la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ agrupado por comuna de residencia (23 de julio de 2015) con datos de estaciones de monitoreo. Líneas representan la cota inferior para declarar episodio Regular ($50 [\mu g/m^3]$), Alerta ($80 [\mu g/m^3]$), Preemergencia ($110 [\mu g/m^3]$) y Emergencia ($170 [\mu g/m^3]$). Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja son el promedio y la mediana respectivamente	47
4.10. Distribución de la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ agrupado por comuna de residencia (24 de julio de 2015) con datos de estaciones de monitoreo. Líneas representan la cota inferior para declarar episodio Regular ($50 [\mu g/m^3]$), Alerta ($80 [\mu g/m^3]$), Preemergencia ($110 [\mu g/m^3]$) y Emergencia ($170 [\mu g/m^3]$). Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja son el promedio y la mediana respectivamente	48
4.11. Regresiones lineales simples en la variable dependiente es la exposición promedio semanal a $MP_{2,5}$ por comuna de residencia con datos de estaciones de monitoreo	49
4.12. Distribución de la distancia promedio diaria entre usuario y estación de monitoreo agrupado por comuna de residencia (23 de julio de 2015). Línea punteada verde representa la resolución espacial de CHIMERE de 2 [km]. Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja representan el promedio y la mediana respectivamente	51
4.13. Porcentaje de usuarios de transporte público expuestos a $MP_{2,5}$ durante intervalos horarios desde el 20 al 24 de julio de 2015 con datos de CHIMERE. La medianoche se presenta en la posición de la etiqueta del día.	53
4.14. Histogramas de usuarios expuestos a $MP_{2,5}$ con datos de CHIMERE.	55
4.15. Aplicación de la metodología a datos de CHIMERE (círculo verde) en la posición de la estación de monitoreo (cuadrado azul). <i>Fuente: Elaboración propia</i>	56
4.16. Porcentaje de exposición que aporta cada actividad en la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ en trabajadores con datos de CHIMERE	59
4.17. Porcentaje de exposición que aporta cada actividad en la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ en estudiantes con datos de CHIMERE	59
4.18. Distribución de la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ agrupado por comuna de residencia (20 de julio de 2015) con datos de CHIMERE. Líneas representan la cota inferior para declarar episodio Regular ($50 [\mu g/m^3]$), Alerta ($80 [\mu g/m^3]$), Preemergencia ($110 [\mu g/m^3]$) y Emergencia ($170 [\mu g/m^3]$). Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja son el promedio y la mediana respectivamente	61
4.19. Distribución de la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ agrupado por comuna de residencia (21 de julio de 2015) con datos de CHIMERE. Líneas representan la cota inferior para declarar episodio Regular ($50 [\mu g/m^3]$), Alerta ($80 [\mu g/m^3]$), Preemergencia ($110 [\mu g/m^3]$) y Emergencia ($170 [\mu g/m^3]$). Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja son el promedio y la mediana respectivamente	62

4.20.	Distribución de la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ agrupado por comuna de residencia (22 de julio de 2015) con datos de CHIMERE. Líneas representan la cota inferior para declarar episodio Regular ($50 [\mu g/m^3]$), Alerta ($80 [\mu g/m^3]$), Preemergencia ($110 [\mu g/m^3]$) y Emergencia ($170 [\mu g/m^3]$). Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja son el promedio y la mediana respectivamente	63
4.21.	Distribución de la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ agrupado por comuna de residencia (23 de julio de 2015) con datos de CHIMERE. Líneas representan la cota inferior para declarar episodio Regular ($50 [\mu g/m^3]$), Alerta ($80 [\mu g/m^3]$), Preemergencia ($110 [\mu g/m^3]$) y Emergencia ($170 [\mu g/m^3]$). Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja son el promedio y la mediana respectivamente	64
4.22.	Distribución de la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ agrupado por comuna de residencia (24 de julio de 2015) con datos de CHIMERE. Líneas representan la cota inferior para declarar episodio Regular ($50 [\mu g/m^3]$), Alerta ($80 [\mu g/m^3]$), Preemergencia ($110 [\mu g/m^3]$) y Emergencia ($170 [\mu g/m^3]$). Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja son el promedio y la mediana respectivamente	65
4.23.	Regresiones lineales simples en la variable dependiente es la exposición promedio semanal a $MP_{2,5}$ por comuna de residencia con datos de CHIMERE	66
5.1.	Distribución de la diferencia de exposición promedio a $MP_{2,5}$ entre trabajar desde el hogar y desde el puesto de trabajo durante la jornada agrupado por comuna de residencia con datos de CHIMERE (23 de julio de 2015). Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja representan el promedio y la mediana respectivamente	72
5.2.	Distribución de la diferencia de exposición promedio a $MP_{2,5}$ entre permanecer en el hogar y mantener el patrón de actividades agrupado por comuna de residencia con datos de CHIMERE (23 de julio de 2015). Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja representan el promedio y la mediana respectivamente	74
A.1.	Uso de tiempo de trabajadores y estudiantes que utilizan el transporte público frecuentemente durante los días laborales del 20 al 24 de julio de 2015.	92
A.2.	Regresiones lineales simples en la variable dependiente es la exposición promedio semanal a $MP_{2,5}$ por comuna de residencia con datos de estaciones de monitoreo	94
A.3.	Regresiones lineales simples en la variable dependiente es la exposición promedio semanal a $MP_{2,5}$ por comuna de residencia con datos de CHIMERE	95
A.4.	Distribución de la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ durante actividad hogar agrupado por comuna de residencia con datos de CHIMERE. Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja representan el promedio y la mediana respectivamente	106
A.5.	Distribución de la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ durante actividad trabajo agrupado por comuna de residencia con datos de CHIMERE. Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja representan el promedio y la mediana respectivamente	107
A.6.	Distribución de la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ durante actividad estudio agrupado por comuna de residencia con datos de CHIMERE. Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja representan el promedio y la mediana respectivamente	108

A.7. Distribución de la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ durante actividad viaje agrupado por comuna de residencia con datos de CHIMERE. Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja representan el promedio y la mediana respectivamente	109
A.8. Distribución de la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ durante actividad otros agrupado por comuna de residencia con datos de CHIMERE. Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja representan el promedio y la mediana respectivamente	110
A.9. Distribución de la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ durante actividad trabajo agrupado por comuna de trabajo con datos de CHIMERE. Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja representan el promedio y la mediana respectivamente	111
A.10. Distribución de la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ durante actividad estudio agrupado por comuna de estudio con datos de CHIMERE. Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja representan el promedio y la mediana respectivamente	112

Capítulo 1

Introducción

Los niveles de calidad de aire en Santiago de Chile son una preocupación para la sociedad, especialmente durante períodos invernales, donde la exposición a material particulado (MP) puede causar daños a la salud humana y generar impactos al ecosistema (WHO, 2006). Los efectos del MP en la salud se relacionan con el diámetro aerodinámico de las partículas produciendo daños a los pulmones, al sistema respiratorio (material particulado grueso o MP_{10} , con partículas de radio menor o igual a 10 micrones) y al sistema cardiovascular (material particulado fino o $MP_{2,5}$, con partículas de radio menor o igual a 2,5 micrones). Además, los altos niveles de MP eventualmente pueden conducir a una mayor cantidad de consultas hospitalarias, menor productividad y muerte prematura (Kim et al., 2015).

A nivel global, la Organización Mundial de Salud (OMS) establece valores guía de exposición a MP con referencia a estudios epidemiológicos en Estados Unidos. Estos dan como resultado que un aumento de 10 [$\mu g/m^3$] de $MP_{2,5}$ en concentraciones anuales y diarias implica un aumento en el riesgo de mortalidad de 6 % y 1 % respectivamente (WHO, 2006). A su vez, la OMS indica que las concentraciones de MP en exteriores contribuyen a aproximadamente 3,7 millones de muertes anuales, siendo ésta la responsable del 6,7 % de muertes totales en el mundo (WHO, 2016).

En la ciudad de Santiago, las concentraciones de MP representan un problema serio donde las montañas que rodean la ciudad contribuyen a eventos de mala ventilación (Muñoz and Alcañal, 2012). De acuerdo a la sección de contaminación atmosférica del reporte del índice de desarrollo del Banco Mundial (WB, 2010), Santiago es la segunda ciudad de Sudamérica que presenta las concentraciones promedio anuales más altas de MP_{10} .

Debido al $MP_{2,5}$, en Chile se reportan alrededor de 4.200 casos anuales de mortalidad prematura por enfermedades cardiopulmonares, 2.500 ataques al corazón y 6.800 admisiones hospitalarias por neumonía en el grupo etario sobre los 65 años. En Santiago, se estima que alrededor de 27.000 personas padecen todos los años problemas relacionados con la contaminación atmosférica causando más de 1.600 muertes anuales (MMA, 2013).

La exposición a contaminantes atmosféricos en personas ha sido objetivo de estudio debido al impacto en la salud de la población por las altas concentraciones presentes en la atmósfera

en zonas urbanas. La manera más usual de estimar la exposición es mediante el uso de dispositivos portátiles, donde el usuario porta el equipo durante su rutina diaria para medir directamente la concentración del contaminante respectivo al cual se encuentra expuesto (Etyemezian et al., 2005; Maré et al., 2015; Cavellin et al., 2015).

Sin embargo, se han identificado otras formas de calcular la exposición utilizando mediciones de concentraciones de contaminantes provenientes de redes de estaciones de monitoreo de calidad de aire (Cortese and Spengler, 1976; Violante et al., 2006) e incluso por medio de simulaciones en modelos numéricos de dispersión de contaminantes (Liu et al., 2013; Dewulf et al., 2016; Yu et al., 2018).

En Santiago, solo se ha estudiado la exposición a $MP_{2,5}$ en un grupo reducido de personas mediante el uso de mini-etatómetros y dispositivos GPS (Geographic Position System) durante viajes diarios en modos de transporte motorizados y bicicletas (Suárez et al., 2014; Salvatierra, 2016). Dado lo anterior, hasta el momento no se conoce con claridad la exposición a $MP_{2,5}$ de un número importante de habitantes durante actividades distintas al viaje.

La contribución de esta tesis es determinar la exposición a contaminantes atmosféricos de una muestra de gran tamaño de usuarios, la cual puede ser calculada de forma regular y en varios horizontes temporales. Específicamente, se cuantifica la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ de habitantes de las comunas de Santiago que utilizan el sistema de transporte público de manera regular para realizar sus actividades cotidianas durante un período invernal.

Por otra parte, se contribuye con un contraste de resultados al estimar la exposición con dos bases de datos de concentraciones de $MP_{2,5}$. Esto permite hacer una comparación de los resultados en términos de exposición a nivel comunal y analizar las diferencias entre una fuente de datos desagregada espacialmente y otra puntual, como es el caso de las simulaciones en modelos numéricos de dispersión y de las estaciones de monitoreo de calidad de aire, respectivamente.

La estructura de la tesis considera en primer lugar una revisión bibliográfica enfocada en el desarrollo del estado del arte de los temas relacionados con la investigación, la cual se encuentra en el Capítulo 2. El Capítulo 3 describe los datos de movilidad y contaminación disponibles en Santiago junto con la propuesta metodológica para calcular la exposición. El Capítulo 4 presenta los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología incluyendo discusiones respecto a la calidad de los resultados. Finalmente, en el Capítulo 5 se exponen las conclusiones tras el desarrollo del trabajo y propuestas para el futuros proyectos.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

El objetivo general de esta tesis es analizar la exposición a material particulado fino de los usuarios frecuentes del sistema de transporte público considerando la movilidad de los usuarios en espacio y tiempo.

Para ello, se busca desarrollar una metodología que estime la exposición combinando datos generados por tarjetas inteligentes utilizadas en el sistema de transporte público con datos de concentraciones de $MP_{2,5}$ de la ciudad de Santiago. Para analizar la exposición, se comparará la exposición resultante de aplicar el método a datos de contaminación de la red de monitoreo de calidad de aire con la exposición obtenida a partir de simulaciones de un modelo numérico de dispersión.

1.1.2. Objetivos específicos

- Utilizar la base de datos de usuarios del sistema de transporte público de Santiago para incluir la movilidad en la estimación de la exposición a $MP_{2,5}$.
- Analizar la exposición calculada a partir de las diferentes fuentes de datos de $MP_{2,5}$.
- Estudiar la variabilidad temporal y espacial de la exposición a $MP_{2,5}$ en usuarios de transporte público caracterizándolos por comuna de residencia.
- Sugerir acciones de política de transporte y salud pública.
- Sugerir nuevas líneas de investigación en base a los resultados obtenidos.

Capítulo 2

Revisión bibliográfica

El presente capítulo, en primer lugar, revisa investigaciones asociadas a la forma de medir concentraciones de contaminantes atmosféricos (Sección 2.1). Luego, expone estimaciones de patrones de movilidad de individuos y su uso de tiempo (Sección 2.2). Finalmente, presenta propuestas metodológicas existentes en la literatura para estimar la exposición a contaminantes atmosféricos usando datos de movilidad y contaminación (Sección 2.3).

2.1. Métodos de estimación de concentración de contaminantes atmosféricos

La concentración de un contaminante cualquiera corresponde al valor promedio de la masa del contaminante medido en el aire, usualmente expresado en microgramos de contaminante por metro cúbico de aire ($\mu g/m^3$) (MMA, 2011). Ante la necesidad de estimar la calidad de aire en la atmósfera, se han desarrollado distintas metodologías para obtener la concentración de contaminantes atmosféricos. Dentro de las más relevantes se pueden mencionar las siguientes:

- *Dispositivos de muestreo personal.* El uso de dispositivos portátiles de muestreo personal es el método más común y sencillo para la obtención de muestras a nivel de individuo, ya que son fáciles de transportar y de bajo costo (Monn, 2001). Permite realizar mediciones en tiempo real y de alta resolución de la concentración de contaminantes atmosféricos tanto en interiores como en exteriores. La medición se basa en el principio de la difusión pasiva de un gas y calcula la concentración en el aire de acuerdo a las Leyes de Fick de difusión (Palmes et al., 1976). Sin embargo, el problema de estos dispositivos es la falta de precisión respecto a mediciones en estaciones de monitoreo. En la literatura, se ha estudiado la calidad del aire de distintas ciudades utilizando dispositivos portátiles, como por ejemplo en Adís Abeba, Etiopía (Etyemezian et al., 2005) y Montreal, Canadá (Cavellin et al., 2015).

- *Estaciones de monitoreo de calidad de aire.* El rol principal de las redes de estaciones de monitoreo es proveer información sobre contaminantes de manera estática. Las redes de monitoreo se diseñan en términos de costo y beneficio al ser difíciles de transportar y presentar un costo operacional elevado a cambio de mediciones altamente precisas en comparación con los dispositivos portátiles. Las estaciones se localizan en lugares donde existen poblaciones importantes para monitorear la atmósfera de grandes áreas urbanas (Maré et al., 2015). Están equipadas con monitores en línea que proveen información continua en resoluciones temporales adecuadas (cada hora o media hora). Las redes de monitoreo de calidad de aire usualmente se centran en medir concentraciones de MP, ozono y compuestos orgánicos volátiles, con muestreadores de partículas, fotometría y espectrometría. Las estaciones de monitoreo se han utilizado para determinar la evolución histórica y actual del estado de la calidad del aire de ambientes contaminados en distintos lugares como África (Escudero et al., 2007), Valle Klang, Malasia (Azmi et al., 2010) y en ciudades como Atenas, Grecia (Mavroidis and Iliá, 2012).
- *Modelos.* Existen modelos numéricos capaces de calcular concentraciones atmosféricas a diferentes resoluciones espaciales y temporales. Generalmente los modelos se agrupan en físicos (o deterministas), estadísticos (o estocásticos) e híbridos, los cuales incorporan tanto parámetros físico-químicos como enfoques estadísticos. Los modelos físicos se basan en ecuaciones matemáticas que describen mecanismos físicos y químicos en la atmósfera, mientras que los modelos estadísticos utilizan mediciones y variables explicativas (Monn, 2001). Se han desarrollado modelos híbridos que incorporan variables meteorológicas, procesos químicos e inventarios de emisiones para predecir el comportamiento espacial y temporal de contaminantes en exteriores (Brasseur et al., 1998). Estos modelos se dividen en dos categorías, los modelos Eulerianos (Menut et al., 2014) que resuelven la ecuación de advección y difusión en una grilla fija, y los modelos Lagrangianos (Draxler and Hess, 1998) en que la componente de advección y difusión son calculados de forma independiente. Por un lado, los métodos Eulerianos son aplicados cuando se consideran escenarios complejos de emisiones al requerir soluciones de las concentraciones en todos los puntos de la grilla. Sin embargo, son necesarias observaciones en una escala comparable a la grilla del modelo. Por otro lado, los métodos Lagrangianos son utilizados cuando se tienen fuentes de emisiones puntuales en algunos puntos de grilla, ya que se adaptan a cualquier resolución.

2.2. Métodos de estimación de movilidad y uso de tiempo

La movilidad de la población se ha estudiado a partir de información sobre la posición geográfica de la población en función del tiempo. Se han propuesto varias metodologías que tienen como finalidad identificar los orígenes y destinos de los viajes de la población, los lugares donde la población realiza sus actividades y el tiempo que le asigna a cada una de ellas.

Una de las líneas de investigación identificadas para obtener información precisa sobre la

movilidad de personas y uso de tiempo en actividades es mediante encuestas. Las encuestas suelen estar diseñadas para reportar las actividades de las personas por medio de la entrega de información detallada sobre los viajes en un cierto período e incorporando preguntas adicionales respecto a información sociodemográfica, características del hogar, descripción de la vivienda, características socioeconómicas y reportes del tiempo asignado a actividades. Este método ha sido aplicado tanto de manera presencial en ciudades de Canadá (Leech et al., 1996), como de forma telefónica en Estados Unidos (Klepeis et al., 2001).

En Santiago de Chile se realiza cada 10 años la encuesta origen-destino (EOD). La encuesta más reciente corresponde al año 2012 (Muñoz et al., 2016), la cual permite conocer el impacto en el sistema de transporte de las políticas y proyectos implementados desde la encuesta anterior, aplicada el año 2001. En el cuestionario del hogar se recopila información sobre las personas del hogar, los vehículos disponibles y el precio de la vivienda. En el registro de viajes, se obtiene información del tipo de usuario (trabajador o estudiante), la hora en que inician los viajes, propósito del viaje, lugar donde fue la actividad, el modo de transporte utilizado y la hora de llegada a destino. La información proveniente de la EOD permite recuperar cómo los individuos asignan su tiempo a sus actividades (Olguín et al., 2009).

La movilidad de los usuarios también se ha descrito con datos de transporte público dada la incorporación en el sistema de tecnologías automáticas de pago con tarjetas inteligentes (o smart cards) y equipos GPS (Pelletier et al., 2011). Dependiendo del nivel de información existente en el sistema de transporte de la ciudad, se han abierto líneas de investigación basadas en la reconstrucción de viajes mediante la identificación del origen y algoritmos para estimar potenciales destinos de los viajes con el fin de describir la movilidad de los usuarios, como por ejemplo en el sistema de transporte de Gatineau, Canadá (Agard et al., 2006) y en el de Beijing, China (Ma et al., 2013).

En el sistema de transporte público de Santiago se han realizado estudios de la movilidad y uso de tiempo de usuarios mediante el uso de la smart card llamada *bip!*. Dado que en este sistema la transacción de pago se realiza en el paradero de subida solamente, se estima el destino del viaje (Munizaga and Palma, 2012), el propósito (Devilleine et al., 2012) y la zona de residencia del usuario (Amaya et al., 2018) para determinar características de los viajes efectuados en el sistema.

Otra propuesta metodológica surge de la utilización de datos generados a partir del uso de teléfonos celulares. Para identificar el patrón de actividades de las personas con datos de celulares, se caracteriza la movilidad mediante la construcción de perfiles espacio-temporales individuales de los usuarios con información del pulso GPS del teléfono. En este caso, se han propuesto diferentes formas para identificar la actividad que realiza la persona. Por ejemplo, en Boston, Massachusetts, determinan la actividad mediante el análisis del uso de suelo correspondiente a la posición del celular (Phithakkitnukoon et al., 2010), pero también se ha propuesto estimar la actividad según el horario y la cantidad de veces que un usuario visita una zona específica (Alexander et al., 2015). También se ha propuesto capturar la movilidad urbana a gran-escala con datos de aplicaciones sociales usadas en teléfonos como Twitter y Foursquare en Nueva York, Chicago y Los Ángeles (Hasan et al., 2013). En Twitter, los usuarios al aceptar ciertos permisos se les añade la posición geográfica correspondiente al lugar donde escribieron un mensaje (*tweet*). Si además el usuario utiliza un servicio de

check-in como Foursquare, se identifica la actividad de la persona en función del tipo de local visitado donde se realiza el registro.

2.3. Métodos de estimación de exposición a contaminantes atmosféricos

La exposición se define como el evento que ocurre cuando una persona (o un grupo de personas) se encuentra en contacto con un contaminante en un instante dado (Ott, 1982). Cabe mencionar que esto no necesariamente implica que la persona inhale o ingiera el contaminante, sino que solamente se refiere a una exposición instantánea. Cuando se considera la duración de la exposición, se habla de *exposición integrada*, la cual es calculada al integrar la concentración del contaminante en el tiempo. Sin embargo, lo más utilizado y fácil de entender es el término de *exposición promedio*, calculada a partir de la división entre la exposición integrada por un intervalo de tiempo específico. La exposición promedio posee unidades de masa por volumen de aire y tiempo (Monn, 2001).

Para conocer la exposición de una persona a un contaminante atmosférico, se debe conocer la localización espacial de la persona y la concentración del contaminante en dicha posición en función del tiempo. La exposición personal se puede medir directa o indirectamente (Ott, 1982).

Bajo el enfoque de la exposición directa a contaminantes atmosféricos, las líneas de investigación más comunes para calcular la exposición en un individuo es mediante el uso de dispositivos de muestreo personal. En estos casos, los usuarios portan equipos durante las actividades en que se quiera calcular la exposición, por lo que se conoce el instante y posición del usuario en detalle. Esta propuesta metodológica para calcular la exposición de una variedad de contaminantes atmosféricos directamente se ha utilizado durante viajes diarios (*commuting*) en modos de transporte como bus, auto, bicicleta y metro en ciudades europeas (Karanasiou et al., 2014; Rivas et al., 2017). En Santiago, también se ha abordado este tipo de metodología de cálculo de exposición a $MP_{2,5}$ en viajes diarios en distintos modos (Suárez et al., 2014) y además en bicicleta con GPS para la exposición a carbono negro (Salvatierra, 2016). Suárez et al. (2014) muestra que la exposición promedio a $MP_{2,5}$ durante viajes diarios por la avenida Alameda y República en los modos bicicleta, bus, auto y metro fue de 51, 60, 47 y 62 $[\mu g/m^3]$ en el período entre marzo y mayo de 2012. Mientras que Salvatierra (2016) encuentra que la distancia a la fuente es el factor más importante en la exposición del ciclista y que el horario en que se realice el viaje no influye significativamente en comparación con el flujo vehicular y el tiempo de espera en intersecciones.

En el enfoque indirecto, los niveles de exposición son medidos de manera estática o determinados por medio de modelos (Ott, 1982). Si se incorpora la movilidad de la población en la ciudad se considera que la exposición calculada es dinámica. En el caso en que se asuma que los habitantes se mantienen en posiciones fijas omitiendo la variabilidad espacial del individuo en el tiempo, la exposición calculada es estática.

En la literatura, se identifican metodologías de estimación de exposición indirecta a conta-

minantes atmosféricos utilizando mediciones en estaciones de monitoreo. Por ejemplo, tanto en Massachussetts, Estados Unidos (Cortese and Spengler, 1976) como en Bologna, Italia (Violante et al., 2006) estiman la exposición indirecta con datos de la red de monitoreo de calidad de aire para compararla con la exposición directa calculada con dispositivos portátiles. En ambos casos, la exposición calculada indirectamente fue menor que la exposición calculada de forma directa en cerca de un 30 %.

Una propuesta metodológica bajo el enfoque del cálculo de la exposición de manera indirecta es modelar la exposición individual trazando las trayectorias de viajes personales con datos de teléfonos celulares en ambientes urbanos (Liu et al., 2013). El potencial de esta metodología recae en la capacidad de reproducir millones de trayectorias y por ende modelar una fracción importante de la población. Los datos de contaminación atmosférica pueden extraerse directamente de la red de monitoreo de calidad de aire y generar mapas de contaminación por medio de interpolaciones espaciales entre las observaciones. La exposición se estima evaluando los campos de contaminación en las trayectorias de los usuarios en términos de espacio y tiempo. La metodología se ha aplicado en Nueva York, Estados Unidos, utilizando datos de celulares y la red de monitoreo de calidad del aire (Nyhan et al., 2016). En este caso, la exposición a $MP_{2,5}$ en los 71 distritos fue calculada ponderando las concentraciones por la cantidad de habitantes por distrito en el período entre abril y julio de 2013. Los resultados muestran que la exposición promedio diaria durante el período de estudio fue entre 7 y 14 $[\mu g/m^3]$ dependiendo del distrito.

En la misma línea de investigación, se ha calculado la exposición con datos de celulares y modelos numéricos de dispersión de contaminantes atmosféricos. Por ejemplo, en Bélgica (Dewulf et al., 2016) se calculó la exposición a NO_2 de 5 millones de usuarios de teléfonos móviles combinando la trayectoria de los usuarios con la concentración de un contaminante proveniente del modelo híbrido RIO-IFDM (Lefebvre et al., 2013). La exposición a múltiples contaminantes también se ha calculado en Shenzhen, China, (Yu et al., 2018) combinando las trayectorias de una muestra de 9.886 tarjetas SIM con las simulaciones del modelo de calidad de aire CMAQ (Byun and Schere, 2006). En Shenzhen, calcularon la exposición a $MP_{2,5}$ en exposición basada en el hogar y en exposición basada en la posición de los registros de los celulares. La exposición en el hogar fue en promedio de 72,5 $[\mu g/m^3]$, mientras que la exposición en el resto de las localizaciones fue de 72,9 $[\mu g/m^3]$.

Capítulo 3

Descripción de datos

En este capítulo se presentan los datos disponibles para realizar una estimación de la exposición a $MP_{2,5}$ de los usuarios de transporte público de Santiago. Como se mencionó en el capítulo anterior, para ello es necesario considerar datos de las concentraciones del contaminante a estudiar y datos de los patrones de movilidad de la población.

Santiago (33.5°S, 70.5°O, 600 m s. n. m.) es la capital y la ciudad más grande de Chile, concentrando casi el 35% de la población del país con un total de casi 7,1 millones de habitantes (INE, 2017). Del total de la población, cerca de 2 millones de personas están matriculados en establecimientos educacionales (MINEDUC, 2018) y alrededor de 3,4 millones son trabajadores (INE, 2018). La topografía que rodea la cuenca de Santiago comprende el cordón de Chacabuco en el norte, la Cordillera de los Andes en el este, la angostura de Paine en el sur y la Cordillera de la Costa en el oeste.

La superficie total de Santiago (641 $[km^2]$) se encuentra dividida en 34 comunas (ver Figura 3.1). Existen marcadas diferencias entre grupos comunas o macrozonas, especialmente en términos de ingreso, tasa de motorización, características del hogar y patrones de movilidad (Amaya et al., 2018). En particular, la zona oriente de Santiago, conformada por las comunas de Providencia, Ñuñoa, Vitacura, Las Condes, La Reina y Lo Barnechea concentran los hogares de mayor ingreso de la ciudad (ver Tabla 3.1).

En este trabajo, el contaminante seleccionado es el $MP_{2,5}$ por sus impactos en la salud en términos de muertes prematuras y admisiones hospitalarias por problemas respiratorios y cardiovasculares (asma crónica, neumonía, infartos, arritmias), por sus impactos en el medio ambiente (visibilidad reducida, acidificación de lagos y ríos, daño a bosques y granjas, degradación de materiales de construcción) y por la disponibilidad de mediciones de concentraciones en Santiago para su estudio. La exposición a $MP_{2,5}$ se calcula para los trabajadores y estudiantes que utilizan frecuentemente el sistema de transporte público, es decir, no se incluye en el análisis a la población más vulnerable (tercera edad y lactantes) ni a personas que no se movilizan por este medio (usuarios de vehículos particulares). El período de estudio considerado corresponde a una semana laboral de invierno desde el lunes 20 al viernes 24 de julio del año 2015, caracterizada por múltiples episodios de mala calidad del aire en términos de $MP_{2,5}$.

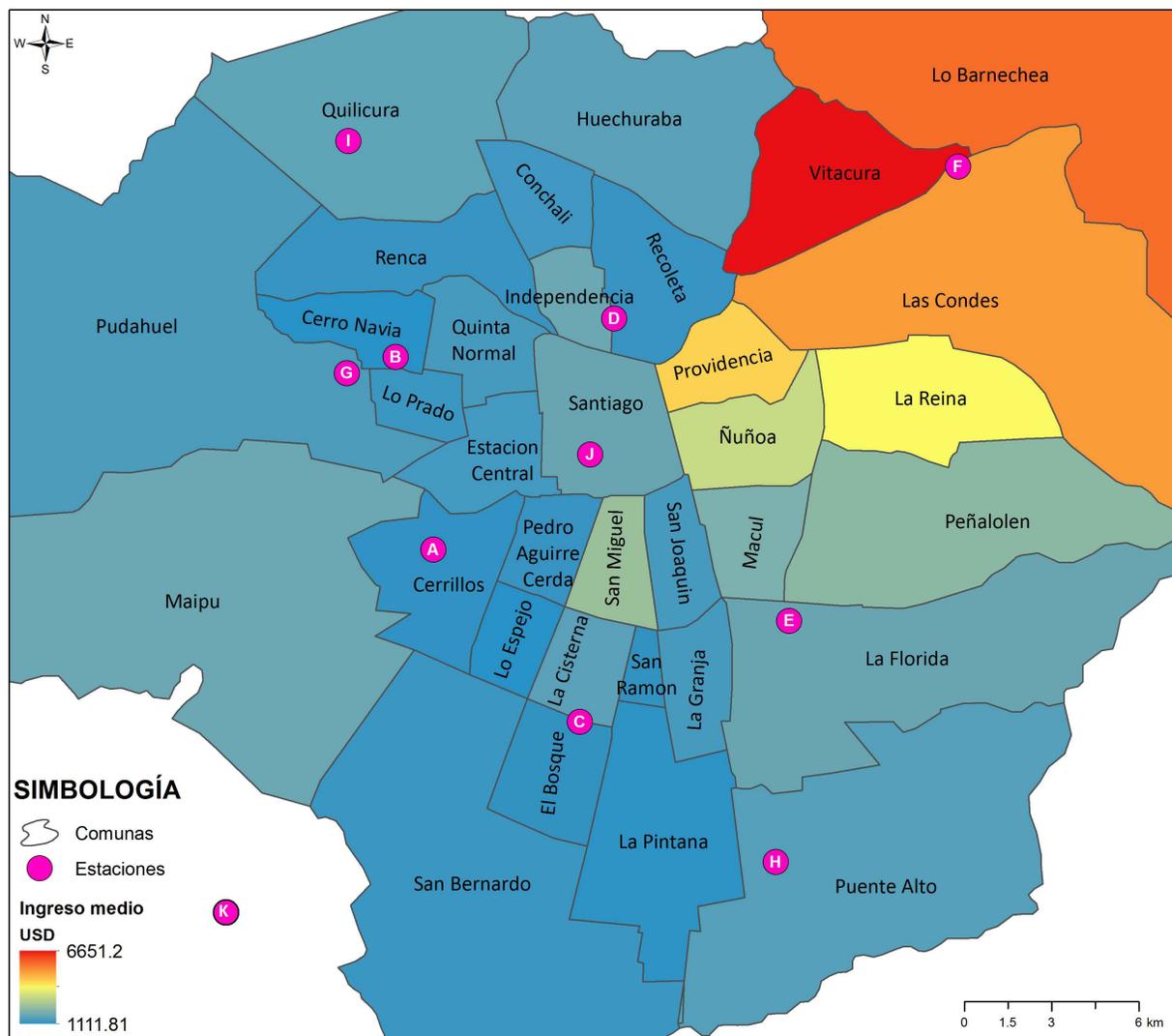


Figura 3.1: Localización de las once estaciones de monitoreo de calidad de aire (círculos rosados): Cerrillos (a), Cerro Navia (b), El Bosque (c), Independencia (d), La Florida (e), Las Condes (f), Pudahuel (g), Puente Alto (h), Quilicura (i), Parque O'Higgins (j) y Talagante (k). La estación Talagante se encuentra fuera del área de estudio a una distancia mayor que la representada en la figura. Además, se muestra el ingreso monetario mensual de los hogares de las comunas de Santiago de mayor (rojo) a menor (azul) [USD/año-2015].
Fuente: Elaboración propia con datos de MDS (2015) y <http://sinca.mma.gob.cl/>

Tabla 3.1: Ingreso monetario promedio mensual del hogar por comuna. *Fuente: MDS (2015)*

Comuna	Ingreso [CLP-2015]
Lo Espejo	727.126
Cerro Navia	751.871
La Pintana	771.295
Cerrillos	795.340
San Ramón	799.686
El Bosque	800.542
Renca	814.008
Pedro Aguirre Cerda	826.752
Recoleta	832.953
Lo Prado	842.128
San Bernardo	852.160
Conchalí	861.005
Estación Central	872.546
San Joaquín	915.400
Quinta Normal	920.701
La Granja	922.539
Pudahuel	946.020
Puente Alto	995.630
Huechuraba	1.041.090
La Cisterna	1.047.006
Quilicura	1.074.345
Santiago	1.158.756
La Florida	1.160.514
Independencia	1.168.187
Maipú	1.168.816
Macul	1.302.307
Peñalolén	1.441.727
San Miguel	1.607.691
Ñuñoa	2.011.212
La Reina	2.537.451
Providencia	2.863.340
Las Condes	3.339.614
Lo Barnechea	3.690.573
Vitacura	4.349.883

3.1. Datos de contaminación atmosférica en Santiago

La red de monitoreo de calidad de aire en Santiago está conformada por 11 estaciones (ver Figura 3.1) y es controlada por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA). Las estaciones de la red miden concentraciones superficiales horarias de SO_2 , NO_x , CO , O_3 , MP_{10} y $\text{MP}_{2,5}$. Cada estación también entrega información de la temperatura, humedad relativa, dirección del viento y velocidad del viento, los cuales no fueron considerados en el presente estudio.

Durante el período de análisis de este trabajo existieron malas condiciones ambientales en términos de $\text{MP}_{2,5}$. El día 20 de julio se observó una baja costera de tipo A (Rutllant and Garreaud, 1995) mientras que las condiciones de los días 24 y 25 se pueden interpretar como el efecto de una baja pre-frontal (tipo BPF) que produjo un flujo descendente de aire a lo largo del Maipo (Rutllant and Garreaud, 1995, 2004). Las condiciones del día 20 corresponden al inicio de las malas condiciones de calidad del aire en la semana y la configuración sinóptica de los días 24 y 25 es la responsable de la Preemergencia observada el día 25 (Mazzeo et al., 2018). La Figura 3.2 muestra las mediciones de las concentraciones horarias de $\text{MP}_{2,5}$ de cada estación de monitoreo de Santiago en el período de estudio. El resumen estadístico de las concentraciones medidas en las estaciones (Tabla 3.2) muestra que existen importantes variaciones en espacio y tiempo. Por ejemplo, las concentraciones promedio diarias de $\text{MP}_{2,5}$ más altas fueron medidas en Cerro Navia ($110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 21 de julio) y Pudahuel ($105 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 23 de julio), ubicadas en el sector norponiente. En cambio, las concentraciones más bajas fueron medidas en la comuna del sector oriente Las Condes ($19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 24 de julio).

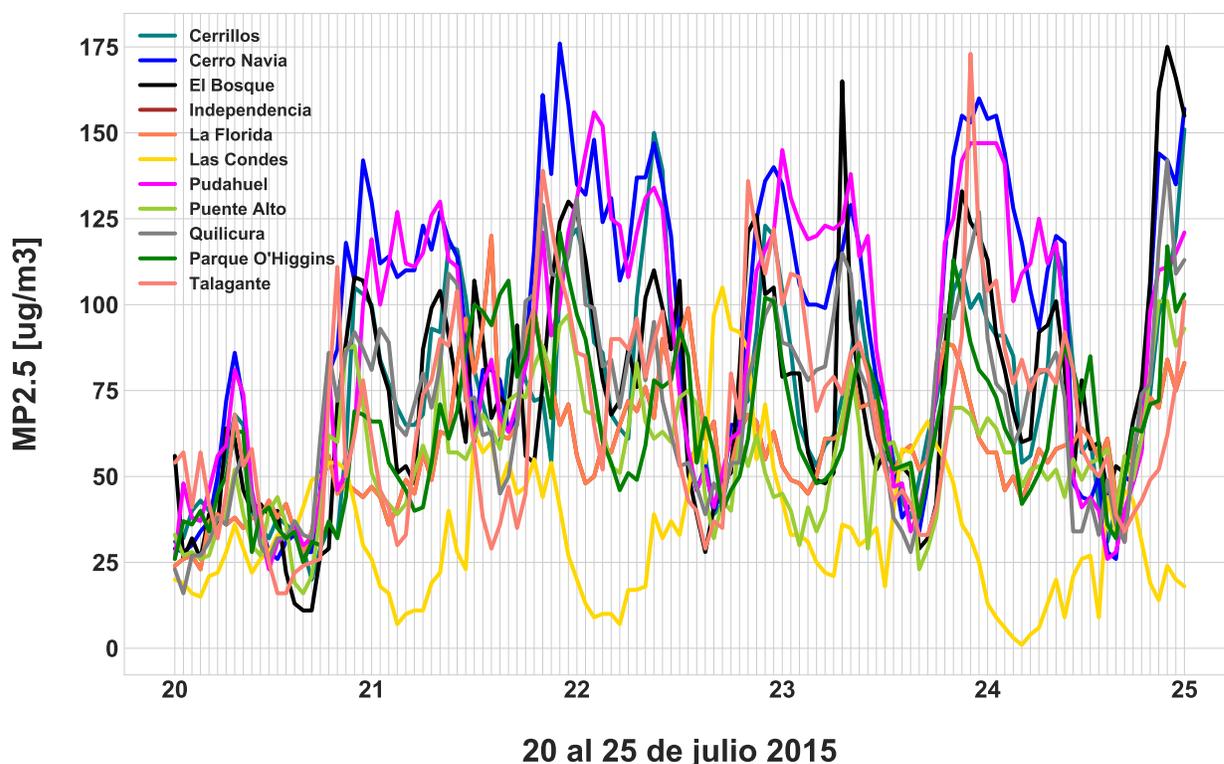


Figura 3.2: Registro horario de $\text{MP}_{2,5}$ de la red de monitoreo de calidad de aire en Santiago desde el 20 al 24 de julio de 2015. La medianoche empieza en la etiqueta del día respectivo.

Fuente: Elaboración propia con datos de <http://sinca.mma.gob.cl/>

Tabla 3.2: Resumen estadístico de concentraciones de $MP_{2,5}$ medidas en estaciones de monitoreo desde el 20 al 24 de julio de 2015.

Estación	Día	Promedio	Desv. Est.	Mínima	Máxima
Cerrillos	20	46	22	20	105
Cerrillos	21	83	19	54	119
Cerrillos	22	86	32	39	150
Cerrillos	23	75	21	38	110
Cerrillos	24	78	29	31	151
Cerro Navia	20	55	34	26	142
Cerro Navia	21	110	30	62	176
Cerro Navia	22	105	37	40	148
Cerro Navia	23	100	38	34	160
Cerro Navia	24	97	45	26	157
El Bosque	20	45	28	11	108
El Bosque	21	82	23	48	130
El Bosque	22	84	29	28	127
El Bosque	23	74	35	29	165
El Bosque	24	89	39	45	175
Independencia	20	38	8	23	56
Independencia	21	68	22	36	120
Independencia	22	66	14	44	99
Independencia	23	63	13	45	89
Independencia	24	59	12	31	84
La Florida	20	38	8	23	56
La Florida	21	68	22	36	120
La Florida	22	66	14	44	99
La Florida	23	63	13	45	89
La Florida	24	59	12	31	84
Las Condes	20	33	12	15	54
Las Condes	21	34	18	7	63
Las Condes	22	45	32	7	105
Las Condes	23	39	14	18	66
Las Condes	24	19	13	1	46
Parque O'Higgins	20	41	13	25	69
Parque O'Higgins	21	77	23	40	121
Parque O'Higgins	22	69	19	40	102
Parque O'Higgins	23	68	19	38	113
Parque O'Higgins	24	68	21	32	117
Pudahuel	20	48	20	23	100
Pudahuel	21	99	22	60	130
Pudahuel	22	101	37	41	156
Pudahuel	23	105	37	34	147
Pudahuel	24	89	40	26	147
Puente Alto	20	41	20	16	88
Puente Alto	21	65	17	39	97
Puente Alto	22	60	13	32	83
Puente Alto	23	51	16	23	82
Puente Alto	24	62	18	40	101
Quilicura	20	46	23	16	92
Quilicura	21	83	22	45	129
Quilicura	22	75	23	39	131
Quilicura	23	80	27	28	127
Quilicura	24	71	30	31	142
Talagante	20	47	23	16	111
Talagante	21	68	32	29	139
Talagante	22	78	29	29	136
Talagante	23	76	32	33	173
Talagante	24	69	22	34	107

En Chile, la norma primaria de calidad de aire para $MP_{2,5}$ establece niveles que originan episodios ambientales cuando la concentración de 24 horas medida en estaciones de monitoreo calificadas como representativas de la población se encuentre dentro de los rangos 80-109 [$\mu g/m^3$] para episodio de Alerta, 110-169 [$\mu g/m^3$] para Preemergencia y sobre los 170 [$\mu g/m^3$] para Emergencia (MMA, 2011). El MMA declaró dos episodios de Alerta ambiental (21 y 23 de julio) y dos de Pre-emergencia (22 y 24 de julio). En estos días hubo suspensión de actividad física en colegios, tanto la quema agrícola como la quema de leña fueron prohibidas y se aplicaron restricciones vehiculares a patentes de vehículos particulares.

Como se ha visto en la Sección 2.1, las concentraciones de contaminantes atmosféricos también pueden ser estimadas usando modelos numéricos de dispersión capaces de reproducir el ciclo de vida de los contaminantes considerando parámetros meteorológicos, emisiones y uso de suelo. Los principales procesos que se simulan y que afectan a las concentraciones son las emisiones, el transporte, la dispersión, las transformaciones químicas y físicas, la deposición y la remoción de las partículas.

Estos modelos entregan concentraciones de MP en la atmósfera con distintas resoluciones temporales y espaciales usualmente expresadas en forma de grillas regulares. En estos casos, los valores de las concentraciones en cada punto de la grilla son equivalentes al valor promedio de la concentración en el área de la celda de grilla correspondiente.

Para estimar concentraciones de $MP_{2,5}$ en Santiago, se ha implementado recientemente un sistema de modelación compuesto por el modelo meteorológico Weather Research and Forecast (WRF) y el modelo de transporte químico CHIMERE (Mazzeo et al., 2018). WRF es un sistema numérico de predicción del clima usado para simulaciones atmosféricas con varias escalas de resolución temporal y espacial (Skamarock et al., 2008). Este modelo ha sido desarrollado con la ayuda de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA) y es utilizada por agencias climatológicas de todo el mundo para predicciones regionales. CHIMERE corresponde a un modelo Euleriano de transporte químico dedicado al estudio de la contaminación atmosférica a nivel regional (Menuet et al., 2014). El modelo requiere información respecto a la meteorología, inventario de emisiones de contaminantes y uso de suelo para correr una simulación. Éste calcula las concentraciones atmosféricas de decenas de especies gaseosas y MP en resoluciones espaciales desde 1 [km] hasta 1° (110 [km] aproximadamente) considerando los efectos de las emisiones, advección, química y deposición de las partículas. CHIMERE ha sido utilizado para el análisis de eventos relacionados con contaminación, pronósticos operacionales y el impacto de la contaminación en la mortalidad (Valari et al., 2011).

Las configuraciones tanto de WRF como CHIMERE han sido adaptadas y aplicadas para el caso de Santiago en el trabajo de Mazzeo et al. (2018). El modelo ha sido validado con mediciones de contaminantes de la red de monitoreo, ajustándolo según las observaciones pero no forzándolo, y ha sido capaz de reproducir las principales características de la dispersión de $MP_{2,5}$ y NO_x durante dos semanas de invierno del año 2015 (15 al 28 de julio). La misma configuración del modelo presentado en Mazzeo et al. (2018) es usado en este trabajo para simular la dispersión de $MP_{2,5}$ en Santiago para el período entre el 20 y 24 de julio. En este caso, la resolución espacial de las concentraciones simuladas es de 2×2 [km] y la resolución temporal es de 1 hora. Como la ciudad posee una superficie aproximada de 640 [km²], entonces

el modelo ofrece cerca de 150 valores de concentración distribuidos cada 2 [km], es decir, más de diez veces el número de estaciones de monitoreo.

En la Figura 3.3, se presenta un campo de concentraciones horario simulado por el modelo para Santiago a las 7:00 a.m. Dentro de cada cuadrante de 20 [km] de lado existen 100 valores de concentraciones de $MP_{2,5}$ al modelar las concentraciones con una resolución de 2×2 [km]. Las altas concentraciones (de 60 a $100 \mu g/m^3$) se localizan en el sector centro, norte y oriente de la ciudad en la madrugada.

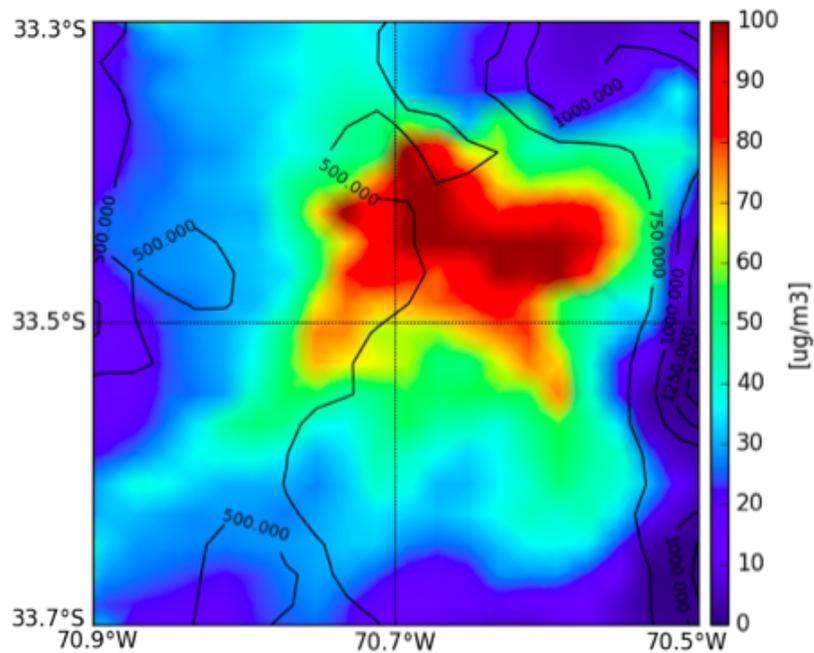


Figura 3.3: Simulación de las concentraciones de $MP_{2,5}$ en Santiago para el día 20 de julio de 2015 a las 7:00 a.m. Las concentraciones están coloreadas de manera continua de más alta (rojo) a más baja concentración (azul).

Fuente: Mazzeo et al. (2018)

3.2. Datos de transporte público y movilidad en Santiago

En Santiago de Chile, desde el año 2007 se consolidó el sistema de transporte público llamado Transantiago como un sistema integrado multimodal entre bus y metro. Actualmente se encuentra supervisado y coordinado por el Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM) que depende del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. El servicio de buses está compuesto por siete empresas privadas con una flota total de 6.500 buses donde todos están equipados con GPS. Estos operan diariamente en una red que contiene 68 [km] de vías segregadas, 150 [km] de vías exclusivas o calles reservadas y más de 11.000 paraderos (ver Figura 3.4). La red integrada de Metro (ver Figura 3.5) posee 6 líneas con 118 [km] de rieles y 118 estaciones y actualmente se encuentra en proceso de expansión con 1 línea adicional (Gschwender et al., 2016). Del total de 18 millones de viajes diarios en Santiago, el 57% es por medio de modos motorizados. Del total de viajes en modos motorizados, el 51% es en transporte público (bus, metro, bus rural o interurbano, taxi colectivo, bus urbano no integrado y tren) (Muñoz et al., 2016).

El sistema tarifario está basado en la cantidad de viajes que se realicen. Se aplica una tarifa base para viajes de hasta 3 etapas dentro de un intervalo temporal de dos horas con un pequeño aumento de tarifa en los períodos punta para los viajes realizados en la red Metro. Los usuarios de Transantiago pagan la tarifa con una tarjeta inteligente (*bip!*), la cual representa la única manera de pagar en buses y Metro en cerca de 4.5 millones de viajes diarios.

La información en esta investigación se obtiene a partir de 3 fuentes. Primero, el pulso GPS que entrega la posición de los buses cada 30 segundos incluyendo latitud, longitud, hora, día y velocidad instantánea (Gschwender et al., 2016). Segundo, información provenientes de las tarjetas inteligentes utilizadas al pagar la tarifa que incluye el instante en que el usuario realizó la transacción al abordar el paradero de buses o estación de Metro y el tipo de tarjeta (regular o estudiantil) (Gschwender et al., 2016). Tercero, existe información complementaria que incluye el trazado de las rutas, la asignación a las rutas, la posición de los paraderos de buses, la posición de las estaciones de Metro y los terminales de buses (Gschwender et al., 2016).

Los datos generados por GPS y tarjetas inteligentes durante viajes diarios de los usuarios de Santiago se han utilizado para estimar los patrones de movilidad en el sistema de transporte público (Munizaga and Palma, 2012; Devillaine et al., 2012; Amaya et al., 2018). Esta información es útil para construir la trayectoria del usuario basado en los paraderos visitados y la frecuencia de las transacciones de la tarjeta. Los usuarios con múltiples transacciones semanales entregan mayor información para realizar estimaciones de las características de sus viajes diarios. Una tarjeta que se utiliza de vez en cuando no entregará tanta información del usuario en comparación con una tarjeta de uso frecuente, por lo que las estimaciones de tarjetas no frecuentes no son tan consistentes con el comportamiento del usuario como las estimaciones con tarjetas frecuentes. El criterio para identificar usuarios frecuentes se basa en la cantidad de días en que la tarjeta aparece en el sistema de transporte. En este trabajo solo se consideran los usuarios clasificados como frecuentes, es decir, cuando la tarjeta se ha utilizado al menos una vez al día durante el período del 20 al 24 de julio de 2015.



Figura 3.4: Mapa de recorridos de Transantiago.
 Fuente: <http://www.transantiago.cl/>

Plano Red de Metro *Metro Network*



Figura 3.5: Red de Metro de Santiago.

Fuente: <https://www.metro.cl/>

Cada viaje tiene un origen y un destino donde la persona realiza una actividad. El paradero de bajada de cada viaje se estima combinando información de la próxima validación de la tarjeta, la línea de transporte público abordada y un perímetro caminable en torno al paradero de la próxima validación donde se asume que la actividad es realizada (Munizaga and Palma, 2012). Con el paradero de subida y el paradero de bajada, se estiman los paraderos por los que el usuario ha pasado durante el viaje observando la secuencia de paradas de la línea del bus correspondiente en el mismo instante del día.

El tiempo que cada usuario usa para realizar una actividad se calcula como el intervalo de tiempo entre el momento en que llega al paradero de bajada y la próxima validación en el sistema de transporte público. El instante cuando los usuarios abordan el bus se obtiene a partir de la validación en el sistema con la tarjeta. El instante en que el usuario llega al paradero de bajada se obtiene a partir de estimaciones en base al pulso GPS equipado en el bus. Estos dispositivos estiman el tiempo de pasada del bus por cada paradero mientras el servicio realiza su recorrido. Estos tiempos son utilizados para calcular el tiempo de viaje de los usuarios entre paraderos.

Las actividades realizadas por los usuarios son clasificadas en viaje, trabajo, estudio, hogar y otros (Devillaine et al., 2012). La actividad viaje es identificada cuando el usuario ha hecho una validación en el sistema de transporte público hasta que llega a su destino. Una vez que el usuario está en su destino, se considera que la actividad se realiza en el paradero de bajada. Para estimar la actividad, se usa el tipo de tarjeta y el tiempo entre las transacciones del usuario en el sistema. El criterio para identificar la actividad trabajo es que el tipo de tarjeta sea adulto, que el tiempo entre transacciones sea mayor a 2 horas y que el viaje no sea el último del día. Para el caso de la actividad estudio, el tipo de tarjeta debe ser estudiante, el tiempo entre transacciones debe ser mayor a 5 horas y el viaje no puede ser el último del día. La actividad hogar se identifica cuando el viaje es el último del día. Finalmente, la actividad otros se detecta para cualquier viaje que se realiza fuera del hogar y que no cumpla con los criterios anteriores, es decir, que el tiempo entre transacciones sea inferior a 2 horas.

Amaya et al. (2018) desarrolló una metodología para estimar la comuna de residencia de usuarios frecuentes de transporte público. La metodología se basa en observar la distribución espacial de los paraderos donde se realizan las primeras transacciones del día entre las 4:00 a.m. y el medio día durante una semana. Si la localización de las primeras transacciones se encuentra a una distancia de a lo más 1 [km] en al menos 3 días distintos, se considera que el usuario reside dentro de esta zona.

En este trabajo se combinaron las metodologías mencionadas anteriormente para construir la estructura de actividades y uso de tiempo de usuarios de transporte público en Santiago. Para ello, los datos crudos son procesados (ver Figura 3.6) para determinar características claves del viaje y la movilidad de usuarios frecuentes. Al ser el período de estudio conformado solo por días laborales, se espera capturar a aquellos usuarios que realizan viajes diariamente de forma regular desde su hogar al puesto de trabajo (o estudio) y viceversa (*commuters*).

La cantidad de usuarios frecuentes de transporte público desde el día lunes 20 al viernes 24 de julio de 2015 es de un total de 105.588 usuarios, cerca del 1,7% de la población de Santiago. Los hogares estimados se localizan en las distintas comunas de la ciudad, donde el 5% vive en la macrozona Norte, 16% en el Oriente, 22% en el Sur-Oriente, 16% en el Sur, 28% en el Poniente y 13% en el Centro (ver Tabla 3.3). La distribución de tarjetas regulares y estudiantiles de los usuarios frecuentes considerados indica que el 82% de las tarjetas corresponden a tarjetas regulares y el 18% a tarjetas estudiantiles. La distribución de los hogares en este estudio es distinta a la distribución real de la población en Santiago (INE, 2017). Esto implica que la muestra posee un sesgo con respecto a la distribución de la población en la ciudad, ya que se consideraron solo aquellos usuarios que no evaden, que estudian o trabajan y que realizan viajes diariamente durante el período de estudio.

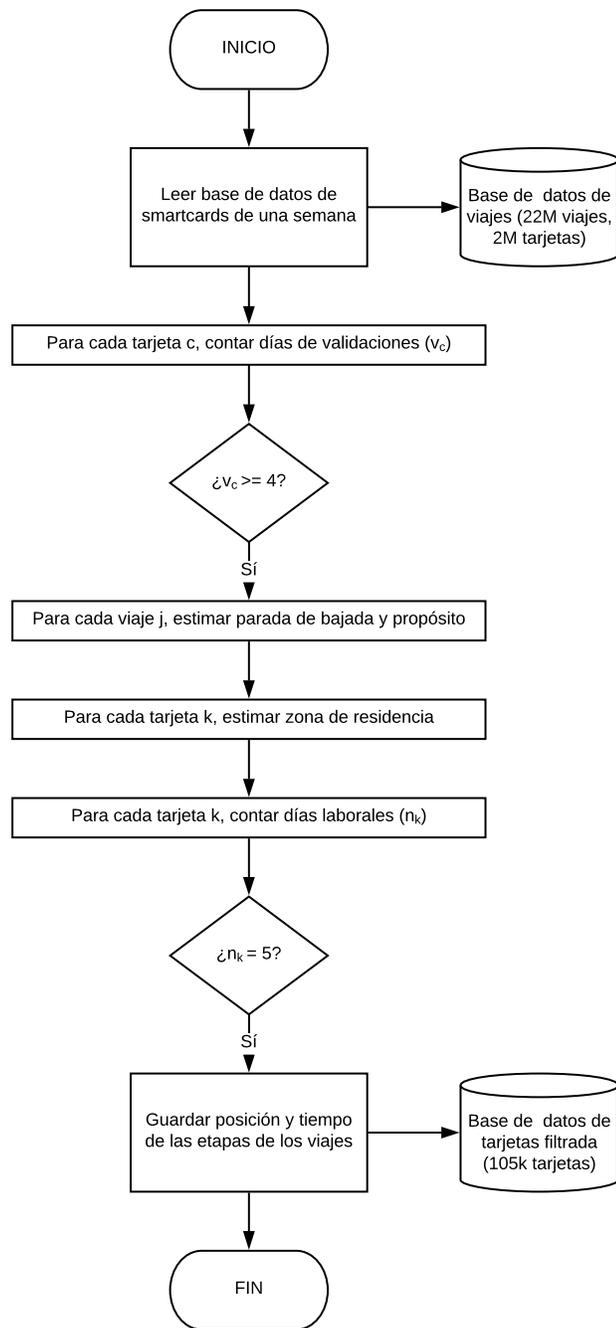


Figura 3.6: Diagrama de flujo ilustrando el procesamiento de datos de smart cards.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3: Distribución de usuarios por comuna de residencia. *Fuente: Elaboración propia*

Comuna	Usuarios	Proporción del total [%]
Santiago	13.329	12,6
Maipú	9.481	9
La Florida	8.741	8,3
Puente Alto	8.114	7,7
Estación Central	6.519	6,2
Lo Prado	5.814	5,5
Las Condes	5.669	5,4
Providencia	5.201	4,9
Pudahuel	4.324	4,1
Ñuñoa	4.062	3,8
San Miguel	3.612	3,4
Peñalolén	3.279	3,1
Macul	2.830	2,7
La Cisterna	2.813	2,7
Recoleta	2.792	2,6
Quinta Normal	1.785	1,7
San Ramón	1.662	1,6
La Reina	1.562	1,5
La Granja	1.417	1,3
San Joaquín	1.389	1,3
Cerro Navia	1.276	1,2
Cerrillos	1.119	1,1
San Bernardo	1.049	1
Conchalí	1.007	1
Pedro Aguirre Cerda	981	0,9
Quilicura	934	0,9
Lo Espejo	878	0,8
El Bosque	858	0,8
La Pintana	823	0,8
Independencia	787	0,7
Renca	522	0,5
Huechuraba	382	0,4
Vitacura	310	0,3
Lo Barnechea	267	0,3
Total	105.588	100

En la Tabla 3.4 se muestra un ejemplo de los datos utilizados de movilidad de un usuario en particular luego de aplicar las metodologías para estimar paradero de bajada (Munizaga and Palma, 2012), actividad (Devillaine et al., 2012) y comuna de residencia (Amaya et al., 2018). En este caso, el usuario inicia su viaje en bus con el propósito de ir a su trabajo a las 7:03 a.m. en un paradero cercano a la zona de residencia.

Tabla 3.4: Ejemplo matriz de etapas de viajes. *Fuente: ADATRAP (Gschwender et al., 2016)*

t_subida	id	modo	servicio	nviaje	t_bajada	par_subida	par_bajada	actividad	comuna_bajada
7:03 a.m.	1	Bus	T401 00R	1	7:33 a.m.	T-17-139-OP-15	T-20-53-OP-50	Trabajo	Santiago
7:22 p.m.	1	Metro	L1	2	7:43 p.m.	U. Chile	H. Magallanes	Hogar	Las Condes
7:47 p.m.	1	Bus	T401 00I	2	8:00 p.m.	T-17-140-PO-40	T-17-139-PO-10	Hogar	Las Condes

El usuario llega a destino a las 7:33 a.m. donde cumple su jornada laboral hasta las 7:22 p.m. donde decide tomar un viaje de dos etapas para volver a su hogar. En la primera etapa aborda el metro en la estación Universidad de Chile de la Línea 1 para bajarse en estación Hernando de Magallanes de la misma línea. En esta estación decide abordar un bus a las 7:47 p.m. para llegar al paradero cercano a su zona de residencia a las 8:00 p.m. finalmente.

Durante el primer viaje del ejemplo, cruzando la información respecto a las etapas del viaje con la secuencia de paradas del servicio, se pueden determinar los paraderos que el usuario visita durante su trayectoria (ver Figura 3.7).



Figura 3.7: Ruta del primer viaje del usuario 1 en transporte público desde el hogar en Las Condes al trabajo en la comuna de Santiago (ver Tabla 3.4)

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 3.5 muestra los paraderos visitados por el usuario en su viaje con la estimación del tiempo de pasada del bus durante la expedición que aborda el usuario.

Tabla 3.5: Secuencia de paraderos visitados por el usuario 1 durante el primer viaje.
Fuente: ADATRAP (Gschwender et al., 2016)

servicio	sitio	paradero	tiempo
T401 00R	ZN-5839	T-17-139-OP-15	20/07/2015 7:03 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-17-139-OP-20	20/07/2015 7:03 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-17-139-OP-25	20/07/2015 7:04 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-17-139-OP-27	20/07/2015 7:04 a.m.
T401 00R	ZN-5839	L-17-33-45-SN	20/07/2015 7:05 a.m.
T401 00R	ZN-5839	L-17-33-40-SN	20/07/2015 7:05 a.m.
T401 00R	ZN-5839	L-17-33-30-SN	20/07/2015 7:07 a.m.
T401 00R	ZN-5839	L-17-33-20-SN	20/07/2015 7:07 a.m.
T401 00R	ZN-5839	L-17-33-15-SN	20/07/2015 7:07 a.m.
T401 00R	ZN-5839	L-17-33-5-SN	20/07/2015 7:08 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-17-140-OP-17	20/07/2015 7:09 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-17-140-OP-20	20/07/2015 7:10 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-17-140-OP-25	20/07/2015 7:11 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-17-140-OP-30	20/07/2015 7:12 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-17-140-OP-35	20/07/2015 7:13 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-17-140-OP-40	20/07/2015 7:14 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-17-140-OP-45	20/07/2015 7:14 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-17-140-OP-50	20/07/2015 7:15 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-17-140-OP-65	20/07/2015 7:16 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-17-140-OP-70	20/07/2015 7:17 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-17-140-OP-75	20/07/2015 7:18 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-17-140-OP-80	20/07/2015 7:18 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-17-140-OP-85	20/07/2015 7:18 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-17-140-OP-95	20/07/2015 7:19 a.m.
T401 00R	ZN-5839	E-14-110-SN-75	20/07/2015 7:19 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-14-135-OP-10	20/07/2015 7:20 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-14-128-OP-20	20/07/2015 7:21 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-14-128-OP-30	20/07/2015 7:22 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-14-128-OP-50	20/07/2015 7:24 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-14-128-OP-60	20/07/2015 7:25 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-14-128-OP-70	20/07/2015 7:25 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-14-128-OP-85	20/07/2015 7:26 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-14-128-OP-94	20/07/2015 7:27 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-14-128-OP-95	20/07/2015 7:27 a.m.
T401 00R	ZN-5839	E-20-53-OP-10	20/07/2015 7:28 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-20-53-OP-20	20/07/2015 7:29 a.m.
T401 00R	ZN-5839	E-20-53-OP-40	20/07/2015 7:32 a.m.
T401 00R	ZN-5839	T-20-53-OP-50	20/07/2015 7:33 a.m.

La distribución de los viajes y etapas en la semana en estudio se observan en las Figuras 3.8 y 3.9 respectivamente. La moda muestra que cerca del 47 % de los usuarios realizan diez viajes en la semana. Del total de viajes, el 55 % son realizados en una etapa y el 47 % en dos etapas. Dado lo anterior, al menos el 55 % de los viajes son en un modo de transporte, ya sea metro o bus, y que el 47 % de la muestra realiza dos viajes diarios por cinco días laborales. Entonces, para el 47 % del total de usuarios considerados, el primer viaje del día tiene origen en el hogar y un destino en el puesto de trabajo (o estudio) y el segundo viaje con origen en el trabajo (o estudio) y destino hogar.

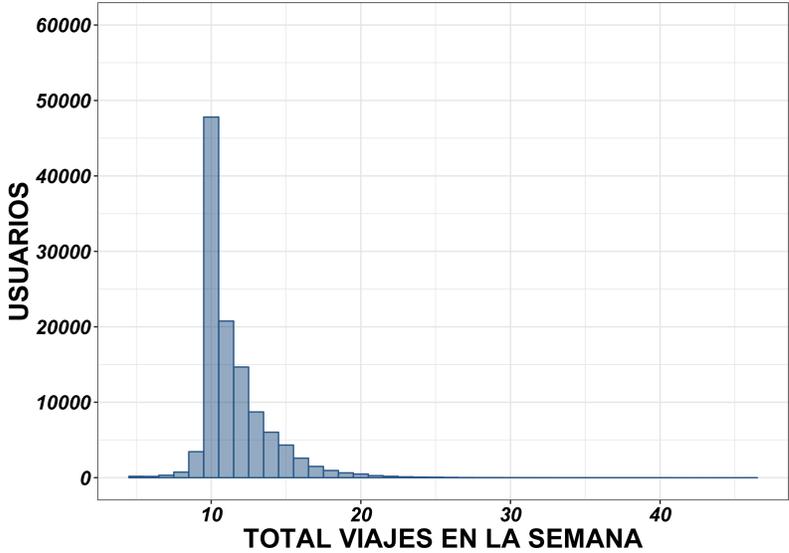


Figura 3.8: Histograma de los viajes de la muestra.
Fuente: Elaboración propia

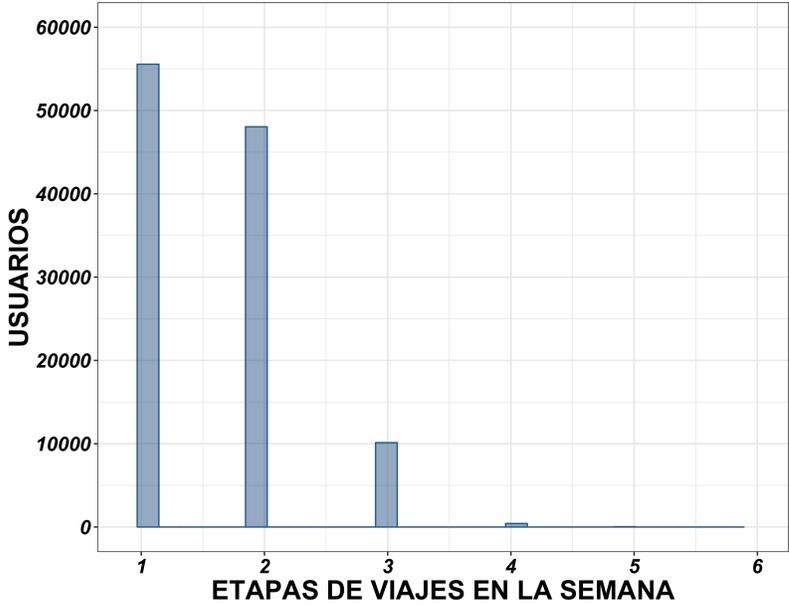


Figura 3.9: Histograma de las etapas de los viajes de la muestra.
Fuente: Elaboración propia

Los usuarios durante actividades basadas en el hogar se distribuyen espacialmente por todo Santiago con una mayor concentración en el sector poniente (28 %) y sur-oriente (22 %) de la ciudad (ver Figura 3.10). La menor actividad se encuentra en el sector norte (5 %).

La distribución de los puestos de trabajo de los usuarios frecuentes de transporte público se localizan principalmente en la zona central y oriente de Santiago en las comunas de Santiago (32 %), Providencia (22,8 %) y Las Condes (12,6 %) (ver Tabla A.3) junto con los ejes principales de la ciudad cubiertos por la red de Metro (ver Figura 3.11). En estos sectores se concentra el comercio y oficinas de todo tipo. La menor densificación de trabajos se encuentra en los sectores periféricos de la zona sur y sur poniente de la ciudad al ser localidades catalogadas como dormitorio, donde las personas suelen pasar su tiempo solamente para dormir.

La distribución de lugares de estudio de los usuarios frecuentes de la muestra se localizan principalmente cerca de las líneas de metro más concurridas (ver Figura 3.12). Estas son la Línea 1 (de oriente a poniente), la Línea 5 (de sur a norte pasando por Puente Alto hasta Providencia) y Línea 2 (paralela a la Línea 2). Tanto colegios como universidades suelen tener alta accesibilidad a estaciones de Metro, por lo que los estudiantes se movilizan en este modo. De forma similar a los puestos de trabajo, los lugares de estudio se concentran en las comunas de Santiago (34,5 %), Providencia (24,3 %) y Las Condes (9,6 %) (ver Tabla A.3).

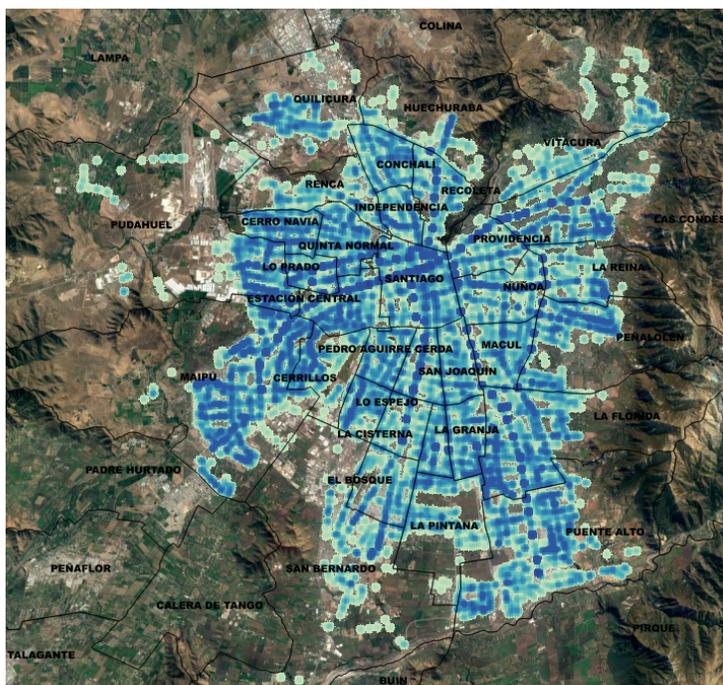


Figura 3.10: Distribución espacial de actividad hogar a las 4:00 a.m. (azul). La oscuridad del color refleja una mayor densidad de usuarios detectados en las cercanías de los paraderos de buses.

Fuente: Elaboración propia

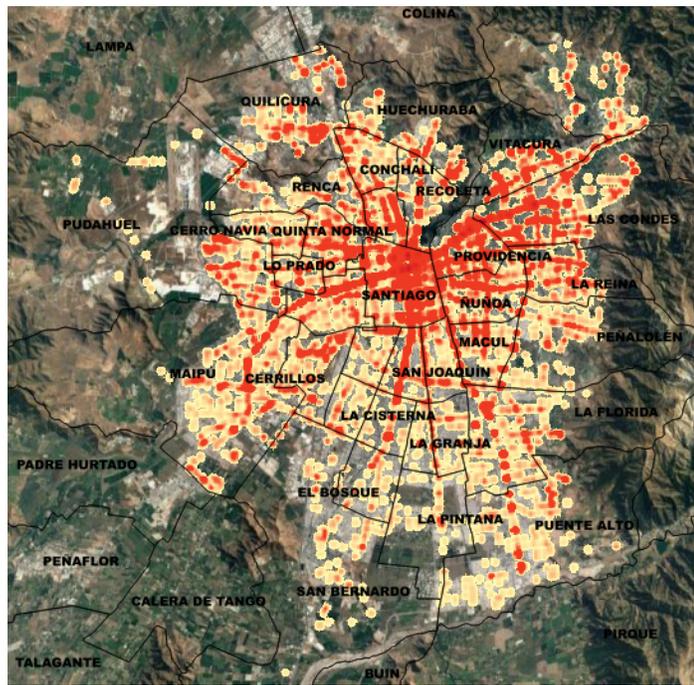


Figura 3.11: Distribución espacial de actividad trabajo a las 2:00 p.m. (rojo). La oscuridad del color refleja una mayor densidad de usuarios detectados en las cercanías de los paraderos de buses.

Fuente: Elaboración propia

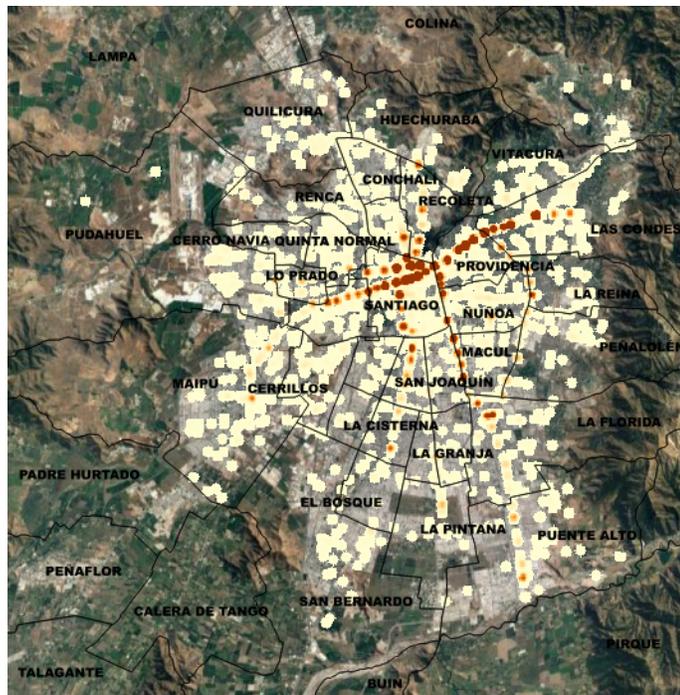


Figura 3.12: Distribución espacial de actividad estudio 2:00 p.m. (café). La oscuridad del color refleja una mayor densidad de usuarios detectados en las cercanías de los paraderos de buses.

Fuente: Elaboración propia

Para estimar cuánto tiempo pasan los usuarios realizando cada actividad, a continuación se muestran los histogramas con las distribuciones de uso de tiempo dedicada a cada actividad considerando el tiempo de caminata y espera en paraderos (ver Figuras 3.13 a 3.17). Además, se estima el uso de tiempo por tipo de usuario agrupados por comuna de residencia para cada actividad, lo cual se muestra en las Tablas 3.6 y 3.7.

En general, los estudiantes están una hora y media más en el hogar (14 horas) que los trabajadores (12,5 horas). En promedio, el tiempo dedicado al trabajo es de 10 horas y en estudio es en promedio de 9 horas. Los estudiantes dedican un 10 % más de tiempo a otras actividades y en promedio ambos tipos de usuario gastan el mismo tiempo en viajar. Los residentes de las comunas céntricas (Providencia, Santiago, Lo Prado, Ñuñoa, Estación Central y Las Condes) gastan entre 36 y 48 minutos en promedio por día en transporte. Mientras que los residentes de las comunas periféricas (San Bernardo, Quilicura, La Pintana, Cerro Navia, El Bosque, Lo Espejo, Maipú, Cerrillos) dedican entre 84 y 102 minutos en promedio para transportarse.

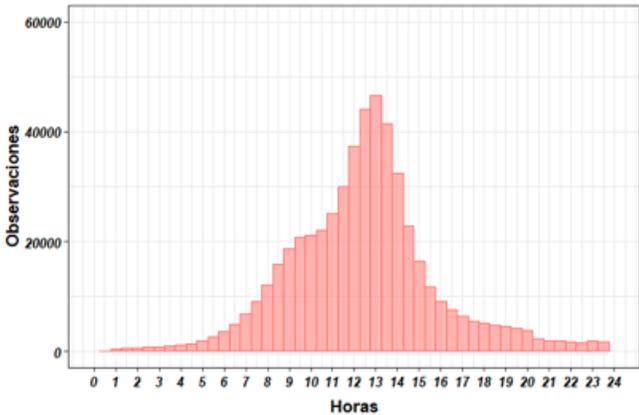


Figura 3.13: Histograma de uso de tiempo dedicado a actividad hogar.
Fuente: Elaboración propia

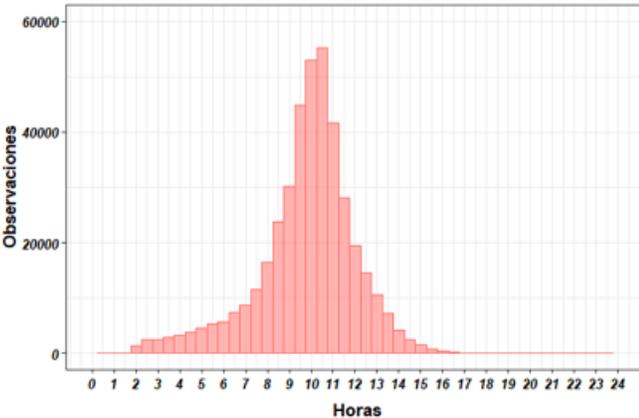


Figura 3.14: Histograma de uso de tiempo dedicado a actividad trabajo.
Fuente: Elaboración propia

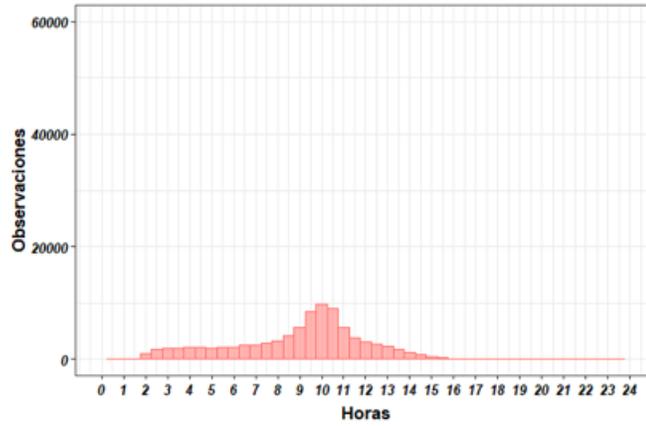


Figura 3.15: Histograma de uso de tiempo dedicado a actividad estudio.
Fuente: Elaboración propia

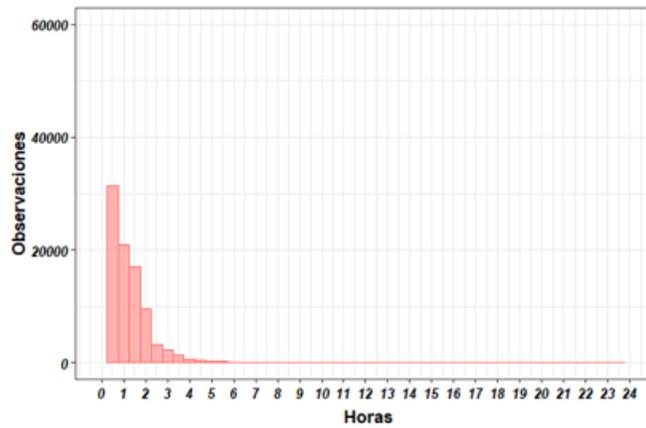


Figura 3.16: Histograma de uso de tiempo dedicado a actividad otros.
Fuente: Elaboración propia

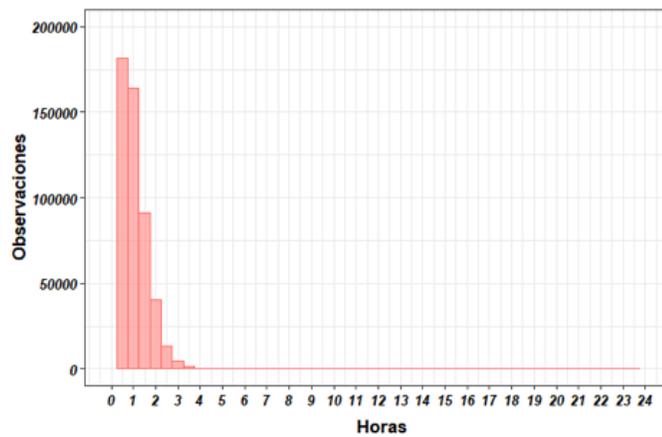


Figura 3.17: Histograma de uso de tiempo dedicado a actividad viaje.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6: Horas promedio y desviación estándar dedicadas a actividades por la comuna de residencia de trabajadores.

Comuna	Hogar	Desv. Est.	Trabajo	Desv. Est.	Viaje	Desv. Est.	Otros	Desv. Est.
Cerrillos	12.0	2.4	9.9	2.1	1.4	0.6	1.0	0.7
Cerro Navia	12.2	2.6	9.6	2.3	1.5	0.6	0.9	0.7
Conchali	12.5	2.5	9.6	2.1	1.2	0.6	0.9	0.7
El Bosque	11.9	2.3	9.9	2.0	1.5	0.5	0.6	0.6
Estacion Central	12.7	2.2	9.8	1.8	0.8	0.5	1.0	0.7
Huechuraba	12.7	2.7	9.5	2.2	1.2	0.6	0.9	0.8
Independencia	12.5	2.6	9.7	2.0	1.3	0.7	0.8	0.9
La Cisterna	12.5	2.0	9.9	1.8	1.0	0.8	1.1	0.7
La Florida	12.5	2.3	9.8	1.9	1.1	0.5	0.9	0.7
La Granja	12.0	2.3	10.0	1.9	1.2	0.5	0.8	0.6
La Pintana	11.6	2.4	10.1	2.1	1.6	0.6	0.7	0.6
La Reina	12.9	2.5	9.5	2.0	1.0	0.5	1.1	0.9
Las Condes	13.2	2.2	9.4	2.0	0.8	0.5	1.2	0.9
Lo Barnechea	12.8	2.5	9.6	1.9	1.3	0.7	0.9	0.6
Lo Espejo	11.9	2.3	9.9	1.9	1.5	0.6	0.8	0.7
Lo Prado	12.7	2.2	9.8	1.8	0.8	0.5	1.1	0.8
Macul	12.6	2.3	9.8	2.0	0.9	0.4	1.1	0.8
Maipu	12.1	2.4	9.8	1.9	1.4	0.6	1.0	0.8
Nunoa	12.9	2.3	9.7	1.9	0.8	0.4	1.1	0.9
P. A. Cerda	12.5	2.4	9.7	2.0	1.2	0.5	0.8	0.6
Penalolen	12.7	2.4	9.6	2.0	1.1	0.5	1.0	0.7
Providencia	13.6	2.5	9.3	2.2	0.6	0.7	1.3	0.9
Pudahuel	12.4	2.6	9.7	2.1	1.2	0.6	1.0	1.0
Puente Alto	11.9	2.1	10.1	1.8	1.3	0.5	0.9	0.7
Quilicura	12.1	2.6	9.7	2.1	1.6	0.9	0.8	0.7
Quinta Normal	12.5	2.5	9.8	2.1	1.1	0.6	0.9	0.7
Recoleta	12.7	2.5	9.7	2.0	0.9	0.6	1.0	0.8
Renca	12.1	2.6	10.1	2.2	1.3	0.7	0.8	0.7
San Bernardo	11.7	2.4	9.9	1.8	1.7	0.6	0.5	0.5
San Joaquin	12.7	2.4	9.8	2.1	0.9	0.5	1.0	0.8
San Miguel	12.7	2.2	9.7	1.8	0.9	0.5	1.2	0.7
San Ramon	12.3	2.4	9.9	2.1	1.1	0.5	0.8	0.7
Santiago	13.1	2.4	9.6	2.0	0.7	0.6	1.2	0.8
Vitacura	12.7	2.7	9.9	2.2	1.4	0.6	0.9	0.6

Tabla 3.7: Horas promedio y desviación estándar dedicadas a actividades por la comuna de residencia de estudiantes.

Comuna	Hogar	Desv. Est.	Estudio	Desv. Est.	Viaje	Desv. Est.	Otros	Desv. Est.
Cerrillos	13.3	3.0	8.9	2.5	1.3	0.5	1.1	0.8
Cerro Navia	13.5	3.5	8.7	2.9	1.4	0.7	1.2	0.7
Conchali	13.9	3.3	8.3	2.7	1.2	0.5	1.2	0.9
El Bosque	13.5	3.1	8.6	2.6	1.4	0.5	0.9	0.6
Estacion Central	13.7	2.9	9.0	2.3	0.7	0.4	1.2	0.8
Huechuraba	13.7	3.5	8.6	2.5	1.2	0.6	1.1	0.8
Independencia	13.8	3.4	8.8	2.6	1.2	0.7	0.9	0.8
La Cisterna	13.3	2.8	9.1	2.4	1.0	1.3	1.2	0.7
La Florida	13.8	3.2	8.7	2.5	1.0	0.5	1.1	0.8
La Granja	13.5	3.2	8.7	2.6	1.1	0.5	1.1	1.1
La Pintana	12.8	3.2	9.0	2.6	1.4	0.5	1.0	1.0
La Reina	14.3	3.5	8.4	2.5	1.1	0.7	1.3	1.2
Las Condes	14.4	3.2	8.4	2.4	0.9	0.4	1.3	0.7
Lo Barnechea	13.4	3.7	9.2	2.8	1.3	0.5	1.2	0.7
Lo Espejo	13.3	3.2	8.7	2.6	1.4	0.5	1.1	0.9
Lo Prado	13.7	3.0	9.0	2.4	0.8	0.7	1.3	1.0
Macul	13.7	3.2	9.0	2.5	0.8	0.4	1.3	0.8
Maipu	13.5	3.3	8.7	2.6	1.3	0.6	1.2	0.8
Nunoa	14.2	3.3	8.6	2.6	0.8	0.4	1.3	0.8
P. A. Cerda	13.7	3.4	8.6	2.5	1.2	0.5	1.1	0.8
Penalolen	13.7	3.2	8.8	2.6	1.1	0.4	1.2	0.8
Providencia	14.8	3.4	8.5	2.6	0.7	1.0	1.4	0.8
Pudahuel	14.0	3.4	8.5	2.8	1.1	0.6	1.2	0.8
Puente Alto	13.1	2.9	9.1	2.4	1.2	0.4	1.1	0.7
Quilicura	13.7	3.9	8.8	2.7	1.5	0.8	1.1	0.7
Quinta Normal	13.7	3.1	8.8	2.5	1.0	0.7	1.1	0.7
Recoleta	14.2	3.2	8.6	2.6	0.8	0.5	1.4	1.0
Renca	13.7	3.4	9.0	2.4	1.2	0.7	1.1	0.8
San Bernardo	13.2	3.5	9.0	2.6	1.6	0.7	0.8	0.7
San Joaquin	14.0	3.3	8.7	2.6	0.8	0.4	1.3	0.7
San Miguel	14.0	3.1	8.7	2.6	0.9	0.6	1.4	1.1
San Ramon	13.7	3.2	8.9	2.5	1.0	0.4	1.1	0.8
Santiago	14.1	3.2	8.9	2.3	0.7	0.7	1.3	1.0
Vitacura	14.5	3.4	8.4	2.7	1.1	0.4	1.1	0.7

Las actividades mencionadas anteriormente ocurren en distintos momentos del día. Por ejemplo, la evolución temporal de la proporción de tiempo dedicado a cada actividad (ver Figura 3.18) muestra que para el día lunes 20 de julio de 2015, las actividades basadas en el hogar se concentran entre las 10:00 p.m. y las 4:00 a.m. del día. A las 8:00 a.m. se observa el período de punta mañana característico por la gran cantidad de personas viajando desde su hogar hacia sus respectivos puestos de trabajo o lugares de estudio. Ya a las 8:00 a.m., cerca del 40 % de los usuarios se encuentra en actividad viaje en la punta mañana hasta las 10:00 a.m., donde el 60 % de la muestra se encuentra en sus puestos de trabajo y el 10 % en sus lugares de estudio. La jornada laboral tiene un peak de usuarios entre las 12:00 p.m. y las 5:00 p.m., donde cerca del 70 % de la muestra se encuentra trabajando. El peak de estudiantes es desde las 10:00 a.m. hasta las 5:00 p.m. donde el 12 % se encuentra estudiando. La vuelta a los hogares comienza cerca de las 6:00 p.m. y la punta tarde característica se observa a las 7:00 p.m.. Entre las 7:00 p.m. y las 8:00 p.m., existe una leve presencia de la actividad otros en la muestra caracterizado por la realización de compras, trámites o actividades relacionadas con el ocio, pero durante la mayor parte del tiempo permanece plana. El uso de tiempo del resto de la semana se adjunta en la figura A.1.

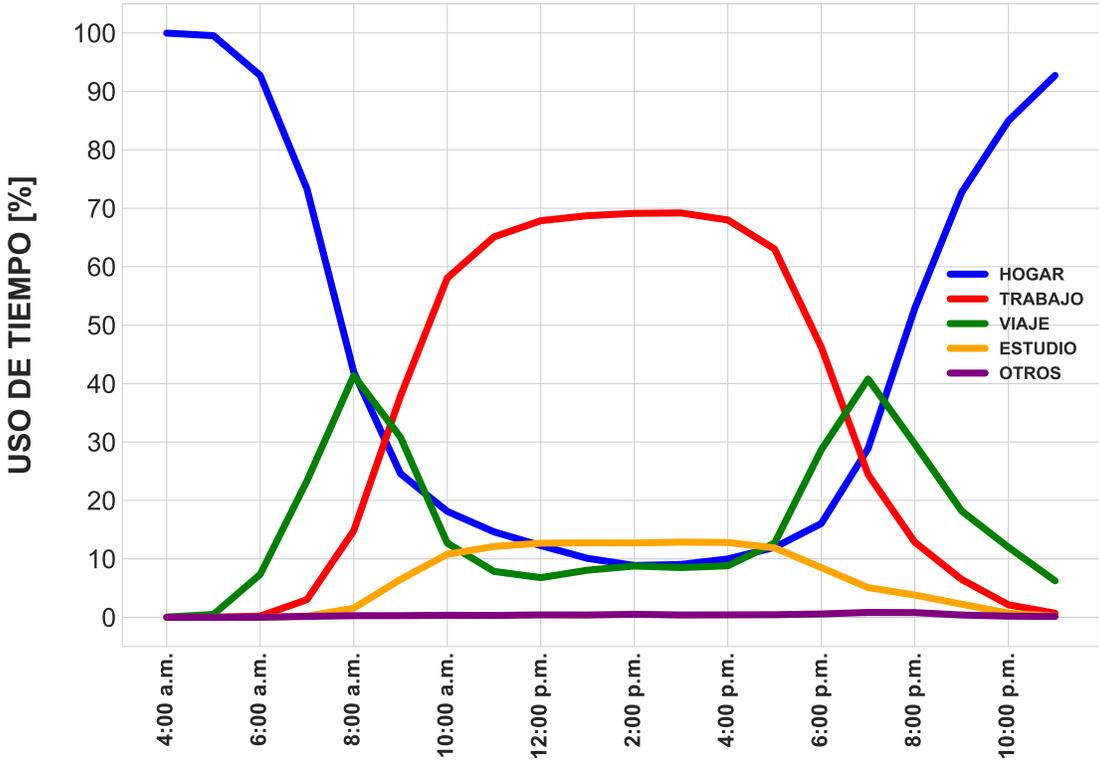


Figura 3.18: Uso de tiempo por actividad en función del tiempo (20 de julio de 2015).

Fuente: Elaboración propia

3.3. Metodología

El método aplicado para estimar la exposición consiste en combinar datos de la concentración de material particulado fino (Sección 3.1) con información sobre movilidad y las actividades diarias de la población (Sección 3.2). Por un lado, la dispersión de contaminantes en la atmósfera de la ciudad genera variabilidad espaciotemporal de las concentraciones de los contaminantes. Por otro lado, la localización y el instante en donde estén los usuarios dependerá del tipo de actividad y el tiempo que le dediquen a cada una de ellas, lo cual también genera variabilidad espaciotemporal. Es decir, el método debe capturar el dinamismo de ambas variables para estimar la exposición al contaminante en estudio.

Para examinar el impacto de los datos de concentraciones en la exposición a $MP_{2,5}$ se compara la exposición resultante con dos bases de datos diferentes:

1. Red de monitoreo de calidad de aire de Santiago (ver Figura 3.1).
2. Modelo de dispersión validado para el caso de Santiago (Mazzeo et al., 2018).

La exposición de un usuario a un contaminante es calculada mediante la estimación del valor de la concentración del contaminante durante las actividades realizadas por el usuario a lo largo del día. En las actividades basadas en el hogar, trabajo, estudio u otros, el valor de la concentración es estimado en la posición del paradero de subida y del paradero de bajada solamente. En cambio, en la actividad viaje, el valor de la concentración es asociado a la posición de cada paradero que el bus pasa durante el recorrido del viaje. Dependiendo de la base de datos a analizar, el valor de la concentración en cada paradero es asignado a la concentración observada en la estación de monitoreo más cercana (ver Figura 3.20) o al punto de grilla más cercano del modelo de dispersión (ver Figura 3.19).

La duración de la exposición en las actividades hogar, trabajo, estudio u otros es asumida como el tiempo asignado a cada actividad. En cambio, la duración de la exposición en la actividad viaje es considerada como el tiempo de viaje entre los paraderos involucrados. Ambas fuentes de datos proveen valores de concentraciones cada una hora completa (por ejemplo, a las 7:00 a.m., 8:00 a.m., 9:00 a.m., y así sucesivamente). El valor de la concentración entre estas horas es asumido constante para ambos casos. El tiempo de inicio y fin de la actividad es asociado a la hora entera más cercana para estimar el valor de la concentración correspondiente. En la actividad viaje, además se asocia el tiempo de pasada del bus por los paraderos involucrados en el recorrido a la hora entera más cercana.

En la Figura 3.19 se muestra un ejemplo de aplicación de la metodología propuesta a los datos de CHIMERE. El usuario i , empieza un viaje en el paradero de subida (1) localizado en la posición $(S_{x_1}^i, S_{y_1}^i)$ en el instante $S_{t_1}^i$. Después de abordar el bus, el usuario viaja y pasa por el próximo paradero (2) en $(S_{x_2}^i, S_{y_2}^i)$ en el tiempo $S_{t_2}^i$. El destino donde el usuario realiza el propósito del viaje está ubicado en $(S_{x_3}^i, S_{y_3}^i)$. El usuario llega al paradero de bajada (3) en el instante $S_{t_3}^i$, el cual es considerado como el momento inicial en que el usuario empieza a realizar la actividad respectiva. El paradero de subida (1) es asignado al valor de la concentración más cercano (C_{x_1}, C_{y_1}) dado que $C_{x_1} \approx S_{x_1}^i$ y $C_{y_1} \approx S_{y_1}^i$. El mismo criterio aplica para el paradero intermedio (2) y el paradero de bajada (3) ya que

(C_{x_2}, C_{y_2}) y (C_{x_3}, C_{y_3}) se encuentran cerca de $(S_{x_2}^i, S_{y_2}^i)$ y $(S_{x_3}^i, S_{y_3}^i)$ respectivamente. Una vez que la posición del valor de la concentración es identificada para cada paradero, se calcula la hora entera más cercana entre $S_{t_1}^i$ y C_t^1 para determinar el valor de la concentración correspondiente al paradero 1 en términos de tiempo. Este mismo procedimiento se aplica para las paradas 2 y 3 en los tiempos $S_{t_2}^i$ y $S_{t_3}^i$. La duración de la exposición a C_t^3 durante la actividad realizada en el paradero de bajada (3) se calcula como la diferencia entre el tiempo en que el usuario inicia el próximo viaje (por ejemplo en el instante $S_{t_4}^i$) y el tiempo en que llegó a destino a ejecutar la actividad $S_{t_3}^i$. La duración de la exposición a C_t^1 durante el viaje en el paradero de subida (1) se calcula como la diferencia entre el instante de llegada al paradero intermedio ($S_{t_2}^i$) y el instante al abordar el bus ($S_{t_1}^i$). A su vez, la duración de la exposición a C_t^2 en el paradero intermedio (2) se calcula como la diferencia entre el tiempo de llegada a destino ($S_{t_3}^i$) y el tiempo de pasada por el paradero intermedio ($S_{t_2}^i$).

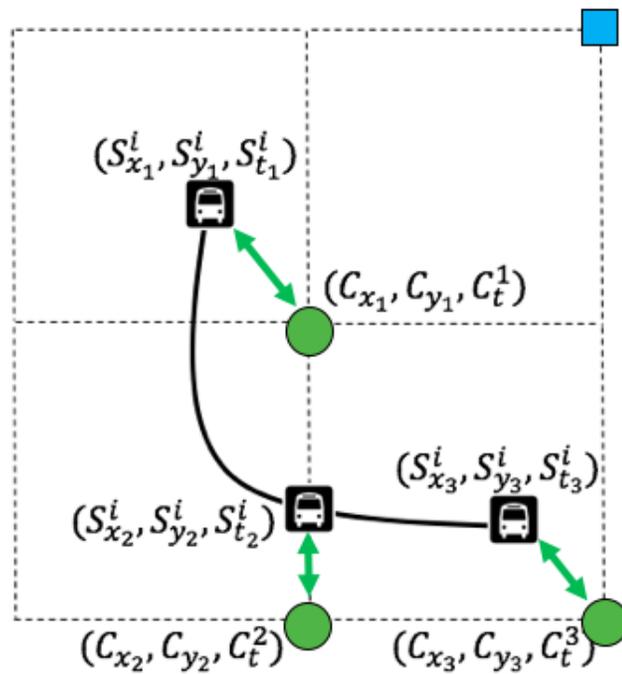


Figura 3.19: Aplicación de la metodología a datos de CHIMERE para estimar la exposición de un usuario i que visita tres paraderos de buses durante un viaje para realizar una actividad en el paradero (3). La trayectoria del viaje se representa con una línea negra sólida, mientras que los valores de las concentraciones son representados por círculos verdes.

Fuente: Elaboración propia

Para el caso en que se utiliza solamente la información proveniente de la red de monitoreo, la metodología es exactamente la misma pero asignando los paraderos por donde pasa el usuario a la estación de monitoreo más cercana como se muestra en la Figura 3.20.

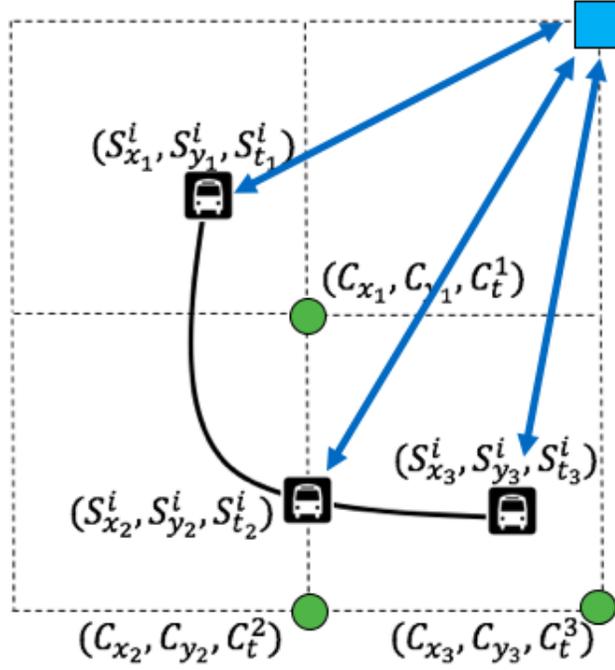


Figura 3.20: Aplicación de la metodología a datos de estaciones de monitoreo para estimar la exposición de un usuario i que visita tres paraderos de buses durante un viaje para realizar una actividad en el paradero (3). La trayectoria del viaje se representa con una línea negra sólida, mientras que la estación de monitoreo es representada con un cuadrado azul.

Fuente: Elaboración propia

La exposición promedio total de cada usuario (i) es calculada integrando los valores de las concentraciones más cercanos a los paraderos visitados con la duración de la exposición, la cual es equivalente al tiempo asignado a cada actividad (ver ecuación 3.1).

$$E_i = \frac{\sum_{t,j} C_t^j (S_{t_{j+1}}^i - S_{t_j}^i)}{\sum_j (S_{t_{j+1}}^i - S_{t_j}^i)} \quad (3.1)$$

Donde:

$S_{t_j}^i$: instante en que el usuario i se encuentra en el paradero j .

C_t^j : valor de concentración de $MP_{2,5}$ en la hora t asociado a la posición del paradero j .

A falta de información adicional sobre las concentraciones de $MP_{2,5}$ en interiores de modos de transporte o construcciones, en este trabajo se considera que la concentración en interiores es igual a la concentración en exteriores para ambas bases de datos. Además, los valores de concentración de CHIMERE son homogéneos espacialmente dentro de la celda de 2 [km] de lado que representa cada punto de grilla, por lo que la concentración es la misma en un perímetro de aproximadamente 20 cuadras hasta que transcurra una hora.

En el caso en que los usuarios realicen viajes en Metro, la exposición en las estaciones durante el recorrido del viaje no es calculada debido a la falta de información de concentraciones de $MP_{2,5}$ en la red subterránea. Sin embargo, la exposición sí es calculada durante las demás actividades en las estaciones de bajada de cada viaje, cuya posición y tiempo son estimadas según la metodología de Munizaga and Palma (2012).

Finalmente, los resultados de aplicar esta metodología a las bases de datos de contaminación y de movilidad presentadas en este capítulo son válidos solamente para los usuarios frecuentes de transporte público en el período de estudio comprendido el 20 y el 24 de julio de 2015. Dado lo anterior, no se consideran las personas más vulnerables a las enfermedades respiratorias y cardiovasculares producidas por la exposición a material particulado fino (tercera edad y lactantes) ni los individuos que se movilizan con otros medios (transporte privado).

Capítulo 4

Resultados

El presente capítulo muestra los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología propuesta para estimar la exposición a material particulado fino. La exposición a $MP_{2,5}$ es calculada en una muestra de 105.588 usuarios frecuentes de transporte público considerando sus patrones de movilidad basados en la smart card *bip!* y campos de concentraciones de $MP_{2,5}$ provenientes de las mediciones de la red de monitoreo de calidad de aire de Santiago (Sección 4.1) y de un modelo validado para Santiago (Sección 4.2).

Al ser calculada la exposición a nivel de paradero, la concentración de $MP_{2,5}$ es asignada tanto a los paraderos por los que pasa durante su viaje, como a los paraderos de bajada y subida donde realiza las actividades (ver Figura 4.1). En un viaje en día laboral, lo usual es que se utilice el transporte público para ir desde el hogar al trabajo y viceversa. Durante las actividades hogar y trabajo, la variabilidad de la exposición es solo temporal al asumir que el usuario se mantiene en las cercanías de un paradero específico para cumplir sus propósitos. Si el usuario se mantiene en una posición durante el día, se calcula la exposición en cada hora dada la naturaleza temporal de los datos de contaminación atmosférica. Durante la actividad viaje, la variabilidad es principalmente espacial en viajes de menos de una hora al ser constante la concentración entre horas completas.



Figura 4.1: Exposición a $MP_{2,5}$ en un día calculada con el modelo para el usuario de la Tabla 3.4 (Hogar: Las Condes; Trabajo: Santiago). Actividades etiquetadas con símbolos: hogar (casa), trabajo (herramienta) y viaje (bus). Color representa magnitud de concentración de más alta (roja) a más baja (verde).

4.1. Exposición calculada con datos de la red de monitoreo de calidad de aire de Santiago

La presente sección expone los resultados de calcular la exposición a la muestra de usuarios frecuentes de transporte público utilizando solo como fuente de datos de $MP_{2,5}$ las mediciones de las estaciones de monitoreo de calidad de aire de Santiago. En este caso, se asignan las concentraciones medidas en la estación de monitoreo más cercana a los paraderos asignados a las distintas actividades de cada usuario durante el período de estudio.

En primer lugar, se estudia la variabilidad de la exposición en función del tiempo asignando la concentración promedio horaria a la que están expuestos los usuarios a distintos intervalos de concentración (ver Figura 4.2). En general, se observan mayores niveles de exposición a $MP_{2,5}$ en distintas horas del día durante la semana invernal en estudio. Los instantes del día en que se encontraron más personas expuestas son a las 8:00 a.m. y a las 10:00 p.m. Las máximas exposiciones horarias resultaron el día 21 de julio a las 10:00 p.m. con un 6 % de los usuarios expuestos a concentraciones sobre los $170 [\mu g/m^3]$ y la noche del 24 a las 9:00 p.m. donde el 8 % estuvo expuesto a los mismos niveles mencionados.

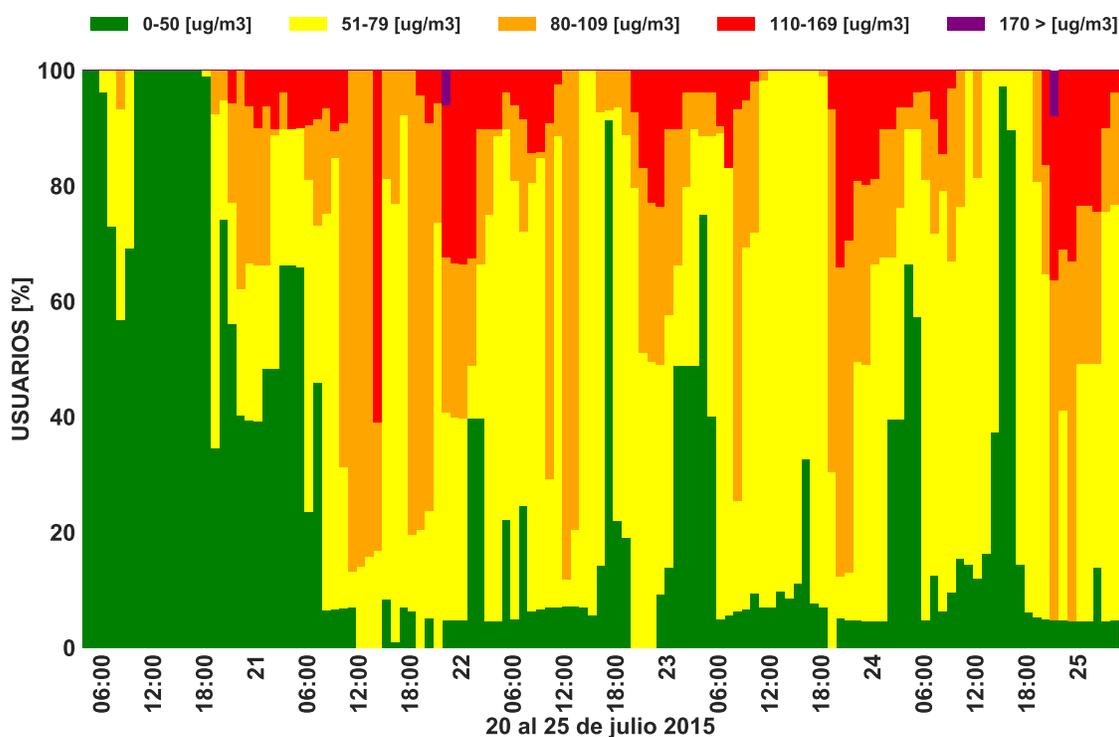


Figura 4.2: Porcentaje de usuarios expuestos a $MP_{2,5}$ durante intervalos horarios desde el 20 al 24 de julio de 2015 con datos de estaciones de monitoreo. La medianoche se presenta en la posición de la etiqueta del día.

En particular, el lunes 20 de julio se observan dos peaks de exposición. El primero a las 8:00 a.m. donde el 7% de los usuarios experimentaron concentraciones de $MP_{2,5}$ entre 80 y $109 [\mu g/m^3]$ y el 37% a concentraciones entre 51 y $79 [\mu g/m^3]$. El segundo se observa entre

las 10:00 y 11:00 p.m. donde el 6 % de los usuarios experimentaron concentraciones de $MP_{2,5}$ entre 110 y 169 $[\mu g/m^3]$ y el 27 % a concentraciones entre 80 y 109 $[\mu g/m^3]$.

El 21 de julio también se identifican dos peaks: a las 2:00 p.m. y entre las 10:00 y 11:00 p.m. nuevamente. En el primer peak, el 61 % de los usuarios experimentaron niveles de calidad de aire entre 110 y 179 $[\mu g/m^3]$ y el 22 % entre 80 y 109 $[\mu g/m^3]$. En el segundo peak, durante esas dos horas el 27 % de los usuarios estuvieron expuestos entre 80 y 109 $[\mu g/m^3]$ y el 33 % entre 110 y 169 $[\mu g/m^3]$. Este peak nocturno se extiende durante las primeras dos horas del día siguiente con niveles similares de exposición.

Al mediodía del día 22 de julio se observa que el 88 % de los usuarios se encuentra afectado por concentraciones entre 80 y 109 $[\mu g/m^3]$ y, nuevamente, entre las 10:00 y 11:00 p.m. se identifica una punta nocturna de exposición donde el 50 % de los usuarios estuvo afectado por concentraciones entre 80 y 179 $[\mu g/m^3]$.

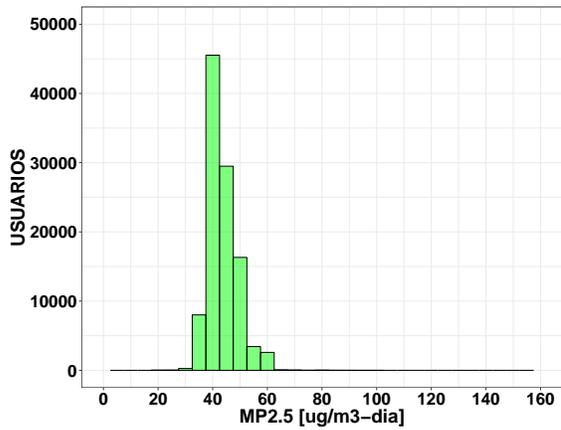
En el día 23 de julio, se identifica un peak de exposición a las 8:00 a.m. donde el 68 % de los usuarios reportaron niveles de exposición entre 80 y 109 $[\mu g/m^3]$ y el 7 % entre 110 y 169 $[\mu g/m^3]$. A diferencia de los días anteriores, la punta nocturna en términos de exposición se produce un par de horas antes que los días anteriores a las 8:00 p.m. con un 34 % de usuarios expuestos a concentraciones entre 110 y 169 $[\mu g/m^3]$ y un 53 % entre 80 y 109 $[\mu g/m^3]$.

En el día 24 de julio también se observa un período punta de exposición a las 8:00 a.m. donde el 20 % de los usuarios estuvieron expuestos a concentraciones entre 80 y 169 $[\mu g/m^3]$. Para este día la punta nocturna se produce en dos horas separadas, a las 9:00 p.m. y a las 11:00 p.m. donde el 95 % de los usuarios presentaron niveles de exposición de entre 80 y 169 $[\mu g/m^3]$ respectivamente.

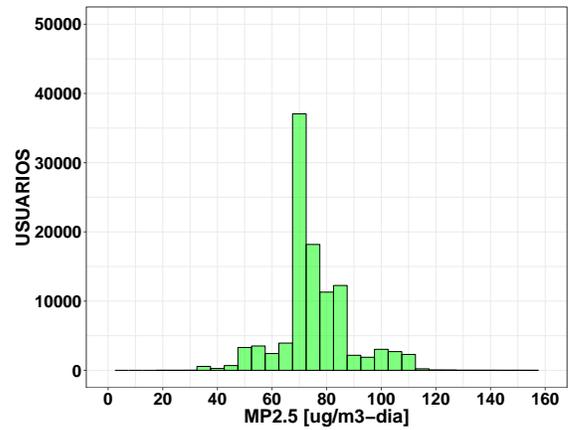
La Figura 4.3 muestra la distribución de la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ de los usuarios calculada con la ecuación 3.1 para cada día desde el lunes 20 al viernes 24 de julio de 2015. En los histogramas se determina la exposición promedio de los usuarios con mayor frecuencia en cada día considerando que realizan actividades en distintos lugares de la ciudad en momentos diferentes.

La distribución de la exposición promedio diaria muestra una proporción importante de usuarios expuestos a las mismas concentraciones de $MP_{2,5}$. En particular, el día lunes 20 alrededor de 45.000 usuarios resultaron expuestos en promedio a 40 $[\mu g/m^3]$, el día martes 21 cerca de 37.000 usuarios figuran expuestos en promedio a 70 $[\mu g/m^3]$, 39.000 usuarios resultaron expuestos a 65 $[\mu g/m^3]$ el día miércoles 22 y el viernes 24 alrededor del 50 % de la muestra resulta expuesto en promedio a entre 60 y 65 $[\mu g/m^3]$. En cambio, el día jueves 23 presenta una distribución más ajustada que las demás, donde cerca de 24.000 usuarios resultaron expuestos a 65 $[\mu g/m^3]$.

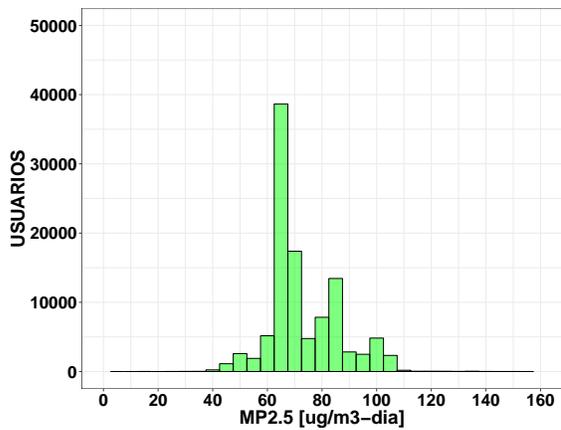
La exposición promedio diaria de la muestra, calculada como el promedio de las exposiciones promedio diaria de todos usuarios, entrega como resultado que la exposición de un usuario frecuente de transporte público desde el lunes 20 al viernes 24 de julio de 2015 es de 44 , 75, 73, 73 y 67 $[\mu g/m^3]$ respectivamente. Este cálculo solo representa a los usuarios frecuentes de transporte público en la ciudad, el cual no necesariamente representa al total de los habitantes de Santiago.



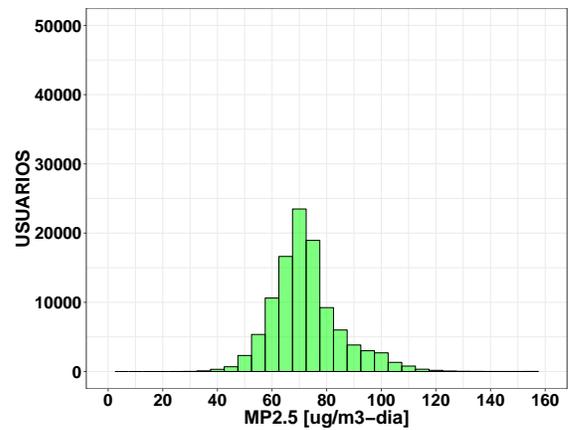
(a) 20 de julio de 2015



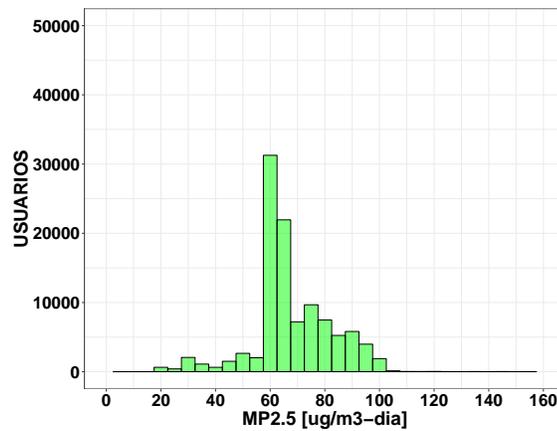
(b) 21 de julio de 2015



(c) 22 de julio de 2015



(d) 23 de julio de 2015



(e) 24 de julio de 2015

Figura 4.3: Histogramas de usuarios expuestos a $MP_{2,5}$ con datos de estaciones de monitoreo

Con la estimación de la exposición promedio diaria de cada persona, se estima la fracción de usuarios que se encuentran expuestos a episodios de alerta, preemergencia y emergencia según los límites establecidos por la norma primaria de calidad de aire para $MP_{2,5}$ (MMA, 2011). La Tabla 4.1 muestra la asignación de los usuarios a los niveles mencionados para

compararla con el pronóstico de la Intendencia y las condiciones de aire observadas en las estaciones de monitoreo. Si el usuario afrontó una exposición promedio por debajo de los 50 $[\mu g/m^3]$ entonces es asignado con el nivel Bueno, si la exposición figura entre 50 y 79 $[\mu g/m^3]$ es asignado como Regular, entre 80 y 109 $[\mu g/m^3]$ como Alerta, entre 110 y 169 $[\mu g/m^3]$ como Preemergencia y sobre 170 $[\mu g/m^3]$ como Emergencia.

Tabla 4.1: Porcentaje de usuarios expuestos a los niveles establecidos por la norma primaria de calidad de aire para $MP_{2,5}$ calculado con datos de estaciones de monitoreo

Día	Bueno	Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia	Pronóstico	Observado (EM)
20	89 %	10 %	0 %	0 %	0 %	-	Regular (C. Navia)
21	3 %	65 %	30 %	2 %	0 %	Alerta	Preemergencia (C. Navia)
22	2 %	67 %	31 %	0 %	0 %	Preemergencia	Alerta (C. Navia)
23	5 %	82 %	13 %	0 %	0 %	Alerta	Alerta (Pudahuel)
24	7 %	73 %	19 %	0 %	0 %	Preemergencia	Alerta (C. Navia)

Como se ha mencionado en el Capítulo 3.1, en la semana del lunes 20 al viernes 24 de julio de 2015 se decretaron 4 episodios medioambientales: dos episodios de Alerta (21 y 23) y 2 episodios de Preemergencia (22 y 24). Los episodios son declarados el día anterior por la Intendencia a partir de información entregada por el MMA y otros organismos. Las máximas concentraciones promedio diarias observadas fueron en la estación de monitoreo de Cerro Navia para los días 20, 21, 22 y 24. Estas observaciones constataron que los pronósticos de Preemergencia no ocurrieron como fueron pronosticados (ver Tabla 4.1) como el día 21. Sin embargo, la Alerta ambiental del día 23 fue pronosticada de manera correcta por lo observado en Pudahuel.

La asignación de personas a los niveles de los episodios utilizando solo la base de datos de $MP_{2,5}$ de la red de monitoreo muestra que los días 21 y 23 de julio de 2015, el 30 % (31.677) y el 13 % (13.727) de los usuarios presenta niveles de Alerta respectivamente. Los días 22 y 24 no se reportaron casos en Preemergencia, pero sí el día 21 con un 2 % (2.112) de los usuarios (ver Tabla 4.1).

La exposición en trabajadores y estudiantes por tipo de actividad muestra que independientemente de la localización del hogar, el 91 % del total de la exposición promedio diaria se concentra en las actividades hogar y trabajo (o estudio) (ver Figuras 4.4 y 4.5). En promedio, la exposición estimada durante la actividad hogar (53 %) resulta mayor que la exposición durante la actividad trabajo y estudio (38 %) en la mayoría de las comunas salvo para los usuarios residentes de Vitacura, Lo Barnechea y Las Condes. La exposición en actividad viaje y otros oscila entre el 10 % y se relaciona con el tiempo dedicado a las actividades dada su gran variabilidad espacial. Aquellos residentes de las comunas con menor tiempo de viaje promedio (Providencia, Santiago, Ñuñoa, Estación Central) muestran los menores porcentajes de exposición por actividad viaje (ver tablas 3.6 y 3.7 en la Sección 3.2). En cuanto a las diferencias entre estudiantes y trabajadores, estas también se relacionan con los diferentes usos de tiempo que tienen los usuarios. En particular, la actividad hogar en estudiantes contribuye un mayor porcentaje en comparación con la actividad hogar en trabajadores.

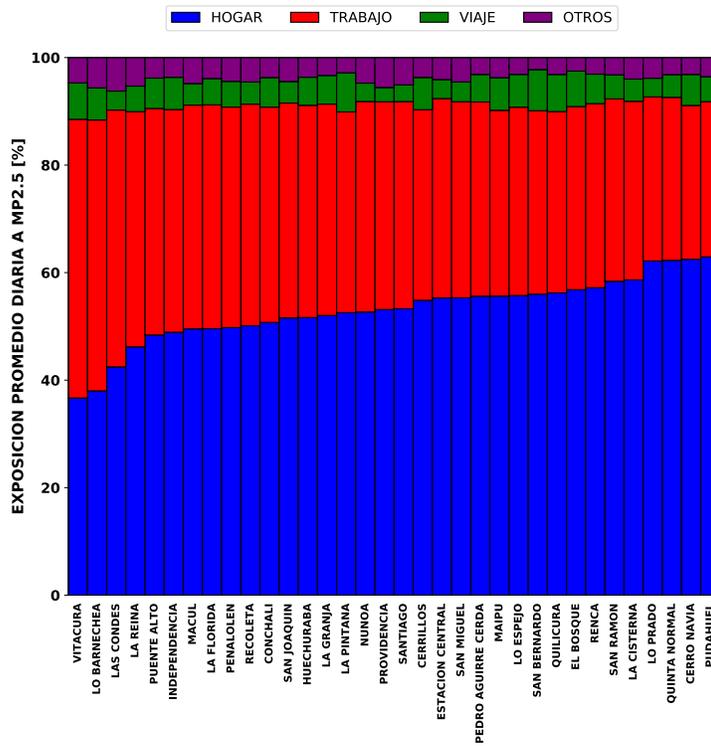


Figura 4.4: Porcentaje de exposición que aporta cada actividad en la exposición promedio diaria a MP_{2.5} en trabajadores con datos de estaciones de monitoreo.

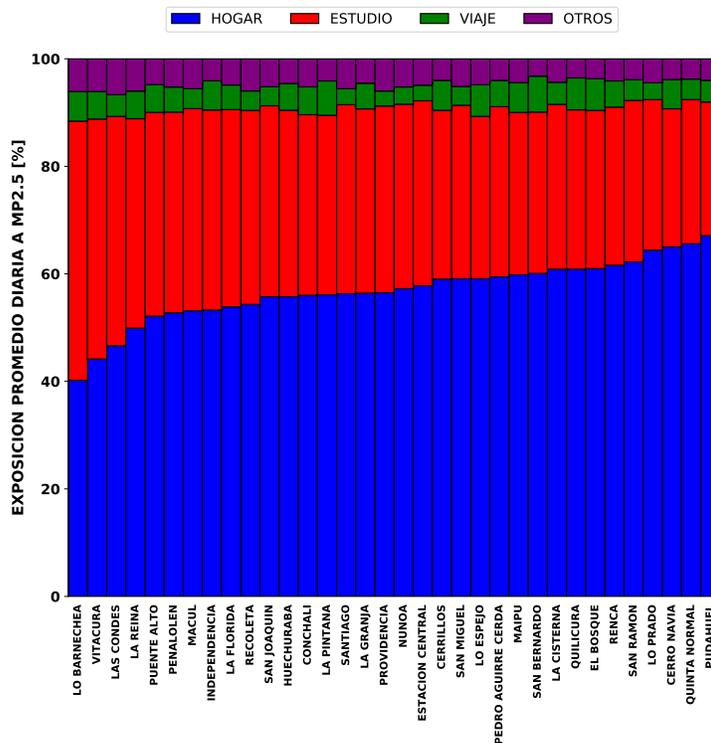


Figura 4.5: Porcentaje de exposición que aporta cada actividad en la exposición promedio diaria a MP_{2.5} en estudiantes con datos de estaciones de monitoreo.

El cálculo de la exposición promedio diaria agrupando a los usuarios por comuna de residencia se muestra en las Figuras 4.6 a 4.10. Las figuras muestran la distribución de la exposición promedio de los usuarios que residen en las comunas de Santiago para cada día del período de estudio. Las comunas están ordenadas por nivel de ingreso monetario promedio del hogar obtenido de la encuesta CASEN del año 2015 (ver Tabla 3.1).

Los resultados agregados por actividad y comuna de residencia muestran que existe una relación espacial entre la exposición promedio diaria y la localización de los hogares de la muestra (ver Figuras 4.6 a 4.10). En general, los diagramas de caja muestran que existe gran variabilidad de la exposición intercomunal entre los residentes de distintas comunas con el transcurso del período en estudio. En el promedio semanal, se reporta una baja variabilidad intracomunal en los habitantes de las comunas de Providencia, Ñuñoa, Macul, Maipú, Independencia, La Florida, Quilicura, Puente Alto, San Joaquín, Conchalí, Recoleta y Cerrillos con desviaciones estándar de entre 4,6 y 6,6 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] (ver Tabla 4.3). La baja variabilidad de la exposición de residentes independientemente de la superficie de la comuna de residencia será discutida más adelante.

En particular, durante los días de la semana estudiada los residentes de las comunas de Cerro Navia, Quinta Normal y Lo Prado presentaron los niveles de exposición promedio más altos con valores entre 51 y 102 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] por día (ver Tabla 4.2). Los mínimos en cada día se observaron en los usuarios de las comunas de Lo Barnechea, Las Condes y Vitacura con valores entre 36 y 61 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

Tabla 4.2: Resumen de la exposición promedio diaria a $\text{MP}_{2,5}$ con datos de estaciones de monitoreo.

Comuna	Días de julio, 2015				
	20	21	22	23	24
Cerro Navia	53	102	98	95	92
Pudahuel	52	99	98	93	90
Quinta Normal	51	97	92	86	87
Lo Barnechea	36	42	48	46	27
Las Condes	38	54	54	59	40
Vitacura	38	56	56	61	41

Los residentes de las comunas que reportaron la mayor exposición son parte de la población de menor ingreso monetario promedio de la ciudad (ver distribución de ingreso en Tabla 3.1). En cambio, los usuarios de las comunas menos afectadas son parte de los hogares de mayor ingreso. Con el fin de sistematizar mejor la comparación entre comunas, se utiliza el Índice de Desarrollo Socio-Económico (IDSE) (Gattini et al., 2014) que incluye el componente de economía (ingreso per cápita mensual; y pobreza), educación (años de escolaridad promedio) y vivienda y saneamiento (material bueno y aceptable de la vivienda; y alcantarillado o fosa séptica). El índice para cada comuna se adjunta en la sección de Anexos (ver Tabla A.5)

Tabla 4.3: Resumen estadístico de la exposición promedio semanal a $MP_{2,5}$ con datos de estaciones de monitoreo.

Comuna	$MP_{2,5}$ Promedio [$\mu g/m^3$]	Desv. Est [$\mu g/m^3$]
Lo Espejo	79.1	7.8
Cerro Navia	92.0	7.1
La Pintana	76.0	11.6
Cerrillos	76.1	6.0
San Ramón	83.2	9.4
El Bosque	84.3	7.4
Renca	79.9	15.9
P. A. Cerda	72.4	9.4
Recoleta	60.4	5.7
Lo Prado	84.9	11.7
San Bernardo	84.2	8.9
Conchalí	62.3	6.6
Estación Central	67.6	8.3
San Joaquín	62.9	5.5
Quinta Normal	86.7	15.6
La Granja	67.9	12.6
Pudahuel	90.2	7.5
Puente Alto	62.7	5.0
Huechuraba	61.8	7.6
La Cisterna	84.3	8.2
Quilicura	72.7	5.0
Santiago	62.3	7.2
La Florida	60.0	4.8
Independencia	59.5	4.6
Maipú	77.1	6.4
Macul	59.5	5.4
Peñalolén	57.7	7.6
San Miguel	71.5	10.9
Ñuñoa	63.0	5.8
La Reina	49.9	14.0
Providencia	59.7	5.9
Las Condes	41.2	15.0
Lo Barnechea	26.8	10.4
Vitacura	39.7	13.7



Figura 4.6: Distribución de la exposición promedio diaria a $\text{MP}_{2.5}$ agrupado por comuna de residencia (20 de julio de 2015) con datos de estaciones de monitoreo. Líneas representan la cota inferior para declarar episodio Regular ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Alerta ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Preemergencia ($110 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Emergencia ($170 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja son el promedio y la mediana respectivamente

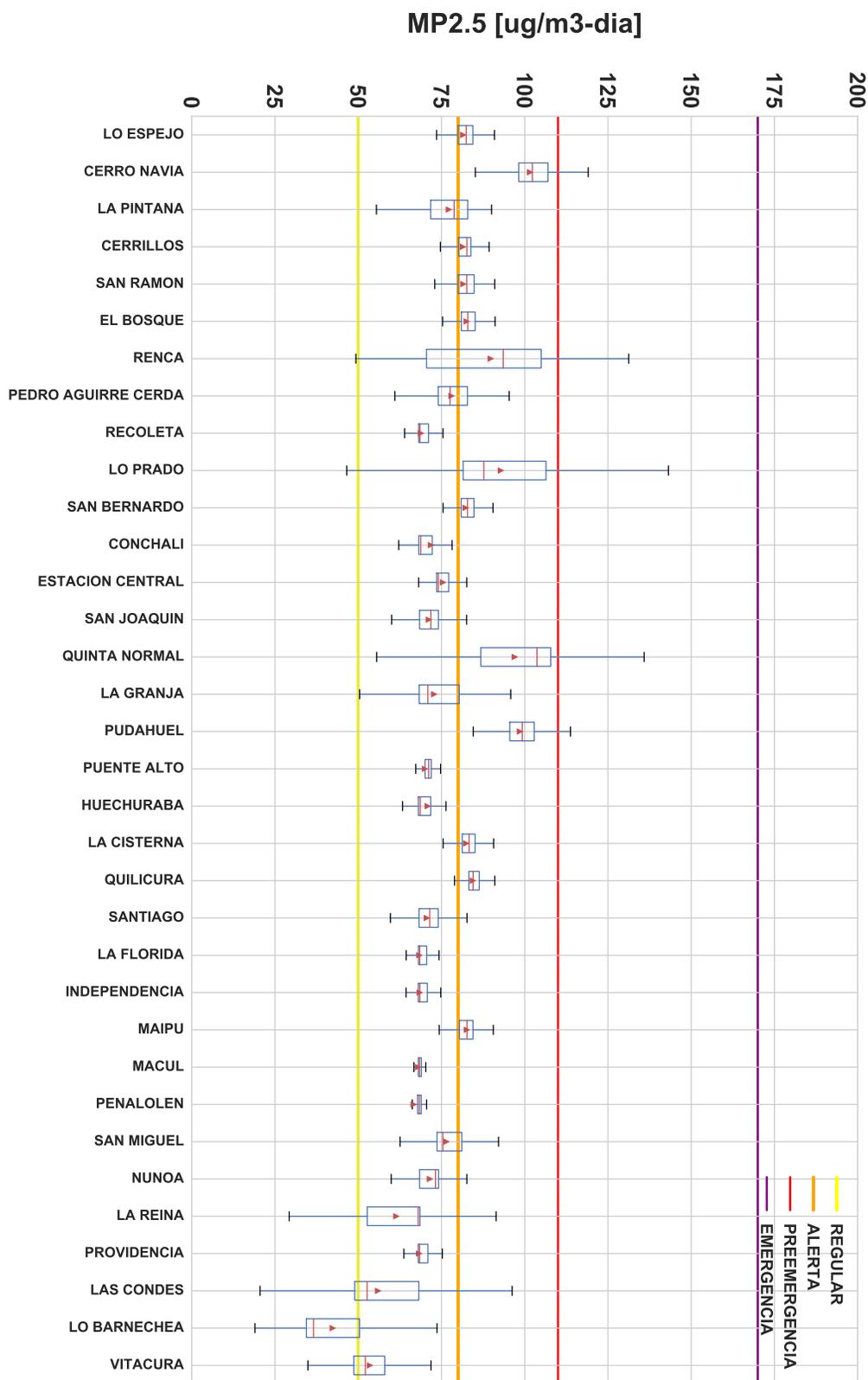


Figura 4.7: Distribución de la exposición promedio diaria a $\text{MP}_{2.5}$ agrupado por comuna de residencia (21 de julio de 2015) con datos de estaciones de monitoreo. Líneas representan la cota inferior para declarar episodio Regular ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Alerta ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Preemergencia ($110 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Emergencia ($170 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja son el promedio y la mediana respectivamente

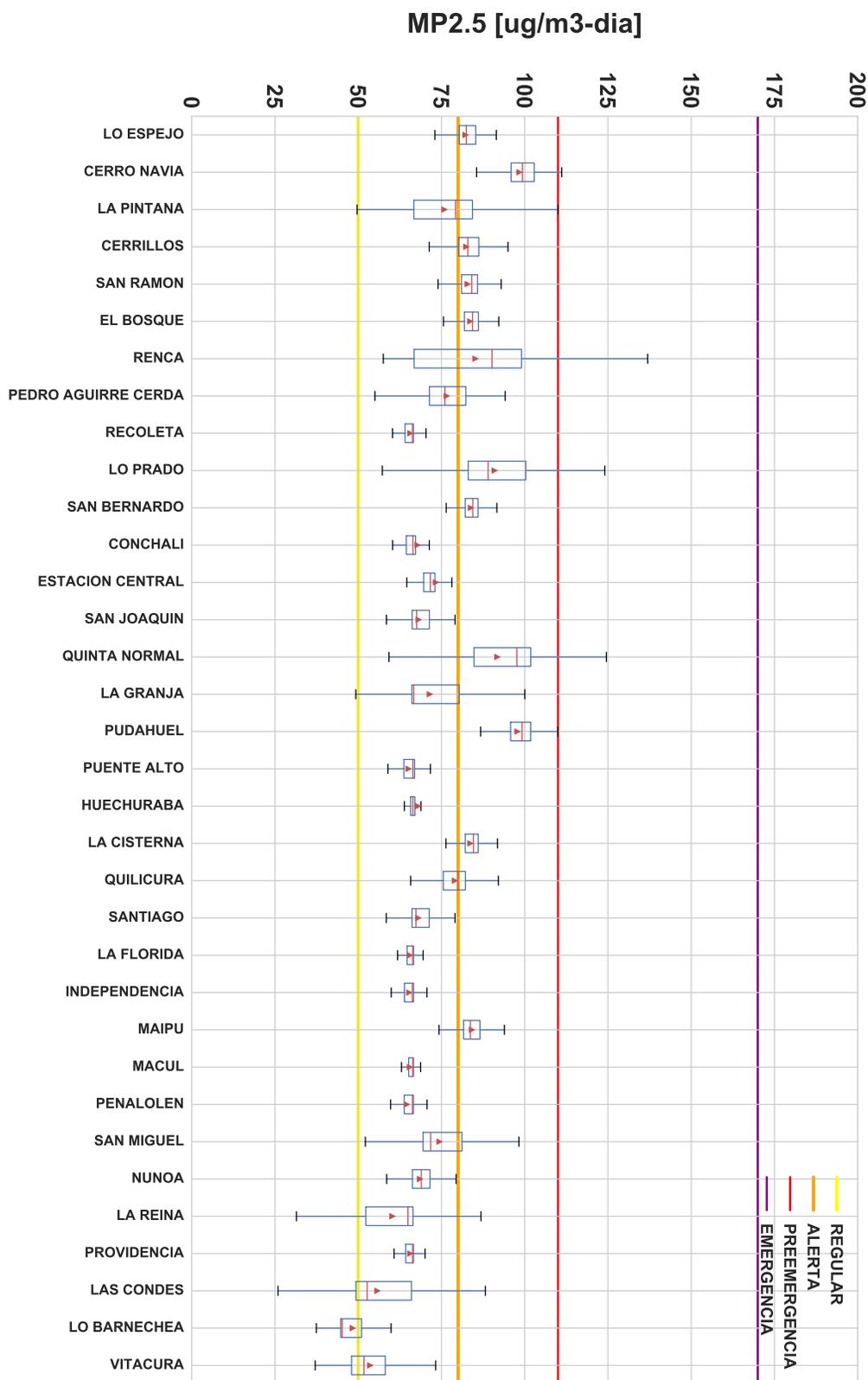


Figura 4.8: Distribución de la exposición promedio diaria a $\text{MP}_{2.5}$ agrupado por comuna de residencia (22 de julio de 2015) con datos de estaciones de monitoreo. Líneas representan la cota inferior para declarar episodio Regular ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Alerta ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Preemergencia ($110 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Emergencia ($170 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja son el promedio y la mediana respectivamente

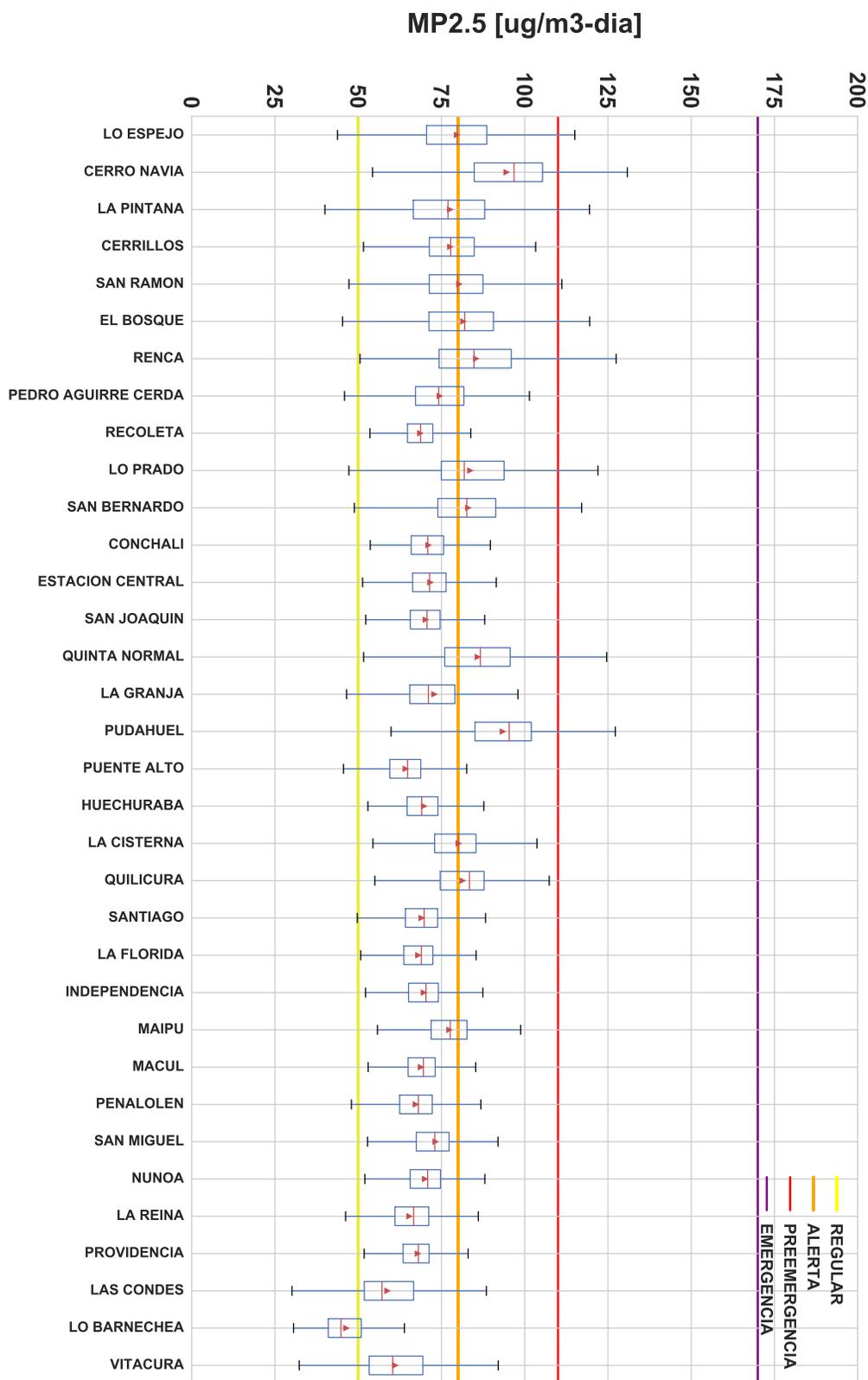


Figura 4.9: Distribución de la exposición promedio diaria a $\text{MP}_{2.5}$ agrupado por comuna de residencia (23 de julio de 2015) con datos de estaciones de monitoreo. Líneas representan la cota inferior para declarar episodio Regular ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Alerta ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Preemergencia ($110 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Emergencia ($170 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja son el promedio y la mediana respectivamente

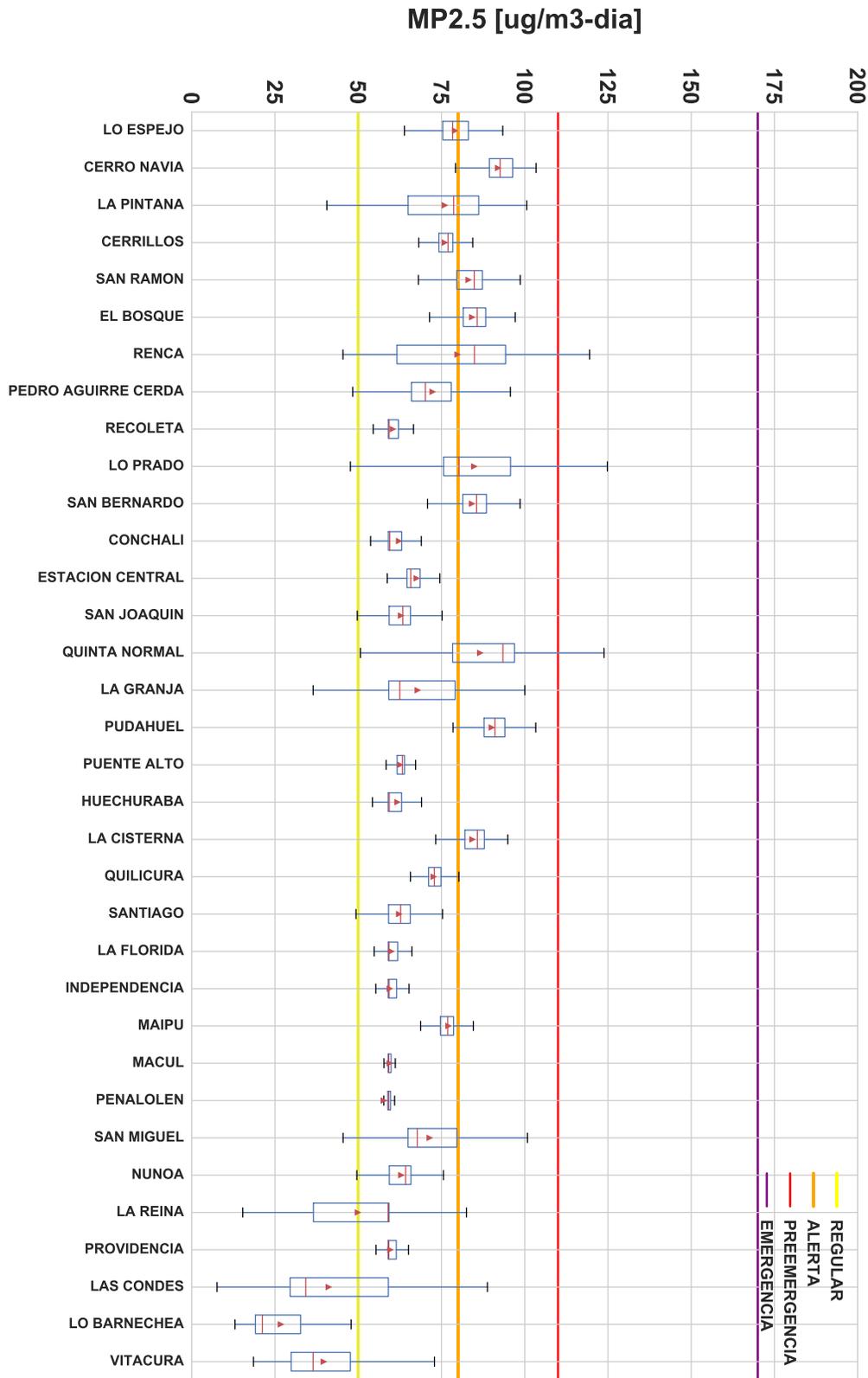


Figura 4.10: Distribución de la exposición promedio diaria a $\text{MP}_{2.5}$ agrupado por comuna de residencia (24 de julio de 2015) con datos de estaciones de monitoreo. Líneas representan la cota inferior para declarar episodio Regular ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Alerta ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Preemergencia ($110 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Emergencia ($170 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja son el promedio y la mediana respectivamente

Con los datos de exposición promedio semanal a $MP_{2,5}$ calculadas con la base de datos de las estaciones de monitoreo, el ingreso monetario promedio por comuna y el IDSE se calcularon regresiones lineales para determinar la correlación entre comuna de residencia y exposición (ver Figura 4.11). En ambos casos la variable es significativa con coeficiente distinto de cero y negativa (ver Tablas 4.4 y 4.5). La regresión en función de la variable ingreso monetario posee un R^2 de 0,51 por lo que explicaría el 51% de la varianza. En cambio, la regresión en función del IDSE solo alcanza un R^2 de 0,38. Sin embargo, existe un cúmulo de puntos en el rango menor a los \$1.500.000 que perturban los resultados, lo cual no ocurre en tal magnitud para el caso del IDSE. La regresión segmentada separando la variable ingreso se adjunta en Anexos (ver Figura A.2 y Tablas A.6 y A.7). A partir de esta segmentación, el ajuste es mejor para los residentes de comunas de ingreso monetario sobre \$1.500.000 ($R^2 = 0,75$) y la pendiente negativa más pronunciada para los usuarios de comunas de ingreso monetario menor a \$1.500.000 ($\beta = -25,19 \times 10^{-6}$).

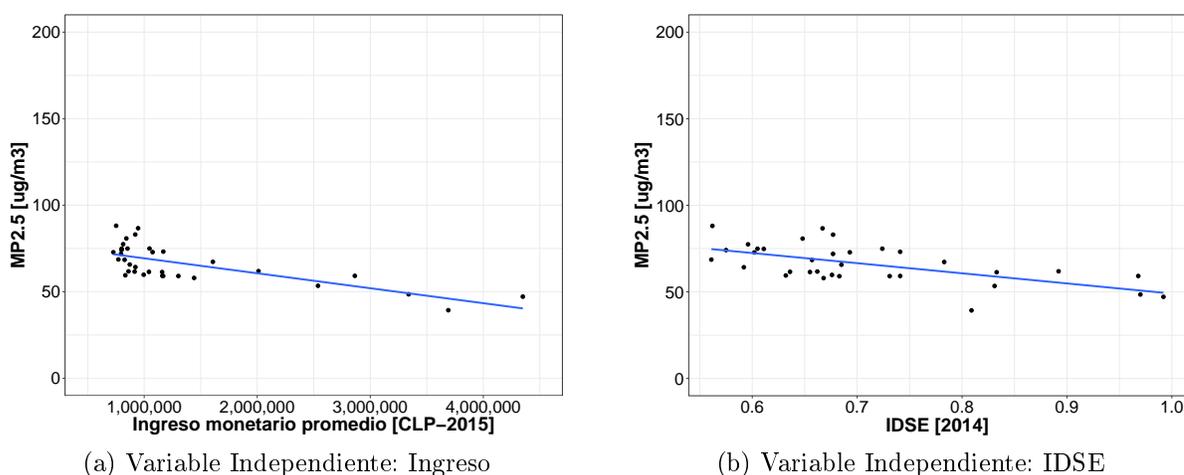


Figura 4.11: Regresiones lineales simples en la variable dependiente es la exposición promedio semanal a $MP_{2,5}$ por comuna de residencia con datos de estaciones de monitoreo

Tabla 4.4: Parámetros de la regresión aplicado al ingreso con datos de estaciones de monitoreo

Variable	Coefficiente	Error Est.	Test-T	R^2
Ingreso	$-8,64 \times 10^{-6}$	$1,48 \times 10^{-6}$	-5,82	0,51
Intercepto	77,9	2,42	32,16	

Tabla 4.5: Parámetros de la regresión aplicado al IDSE con datos de estaciones de monitoreo

Variable	Coefficiente	Error Est.	Test-T	R^2
IDSE	-58,5	13,18	-4,44	0,38
Intercepto	107,5	9,44	11,40	

La baja variabilidad de la exposición intercomunal e intracomunal es producto de que los usuarios residentes de diferentes comunas o de la misma comuna son asociadas a la misma estación de monitoreo. Como la exposición se calcula en base a las mediciones en 11 estaciones de monitoreo, una estación representa más de una comuna. En particular, los grupos de comunas presentados en la Tabla 4.6 se localizan una al lado de otra, por lo que la distancia a la estación más cercana debe ser similar. Sin embargo, la distancia entre el usuario y la estación más cercana puede variar significativamente durante el día tanto por la limitada cobertura de la red de monitoreo como por la movilidad del usuario.

Tabla 4.6: Exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ [$\mu g/m^3$] con datos de estaciones de monitoreo

Comuna / Día	20	21	22	23	24
El Bosque	48	83	84	83	84
San Bernardo	48	82	84	82	84
La Cisterna	48	82	84	80	84
Huechuraba	41	71	68	70	62
Conchalí	41	72	68	71	62
Ñuñoa	41	72	69	70	63
San Joaquín	41	71	68	70	63
Santiago	41	71	68	69	62
Macul	39	68	66	69	59
La Florida	40	68	66	68	60
Independencia	39	69	65	70	60
Recoleta	39	69	66	69	60
Providencia	39	68	66	68	60

Por ejemplo, la distribución de la distancia promedio entre los usuarios de la muestra y las estaciones de monitoreo más cercanas durante el día 23 de julio de 2015 muestra que los usuarios que viven en una comuna de residencia donde existe una estación de monitoreo (El Bosque, Independencia, Cerro Navia, Cerrillos, Pudahuel, La Florida y Puente Alto) suelen posicionarse a una distancia promedio menor a 3 [km] durante sus actividades diarias (ver Figura 4.12) a excepción de los residentes de Quilicura y Las Condes. No obstante, los habitantes de todas las comunas de residencia se localizan en promedio a distancias sobre los 2 [km]. En particular, los residentes de La Reina realizan sus actividades a una distancia promedio de 5,6 [km] de la estación de monitoreo más cercana (ver Tabla 4.7).

Lo anterior da lugar a analizar cómo cambian los resultados si se utiliza información sobre las concentraciones de $MP_{2,5}$ que estén por debajo de los 2 [km] de resolución espacial. Los valores de concentraciones simulados por el modelo CHIMERE son basados en una grilla de 2×2 [km] de resolución, por lo que la distancia máxima a la que un usuario estaría a un punto de grilla es de aproximadamente 1.4 [km] (la mitad de la diagonal de un cuadrado de lado 2 [km]). En la siguiente sección, se presentan los resultados de aplicar la metodología propuesta con los datos de las simulaciones de la dispersión de $MP_{2,5}$ realizadas por CHIMERE junto con un análisis de los resultados provenientes de ambas bases de datos.

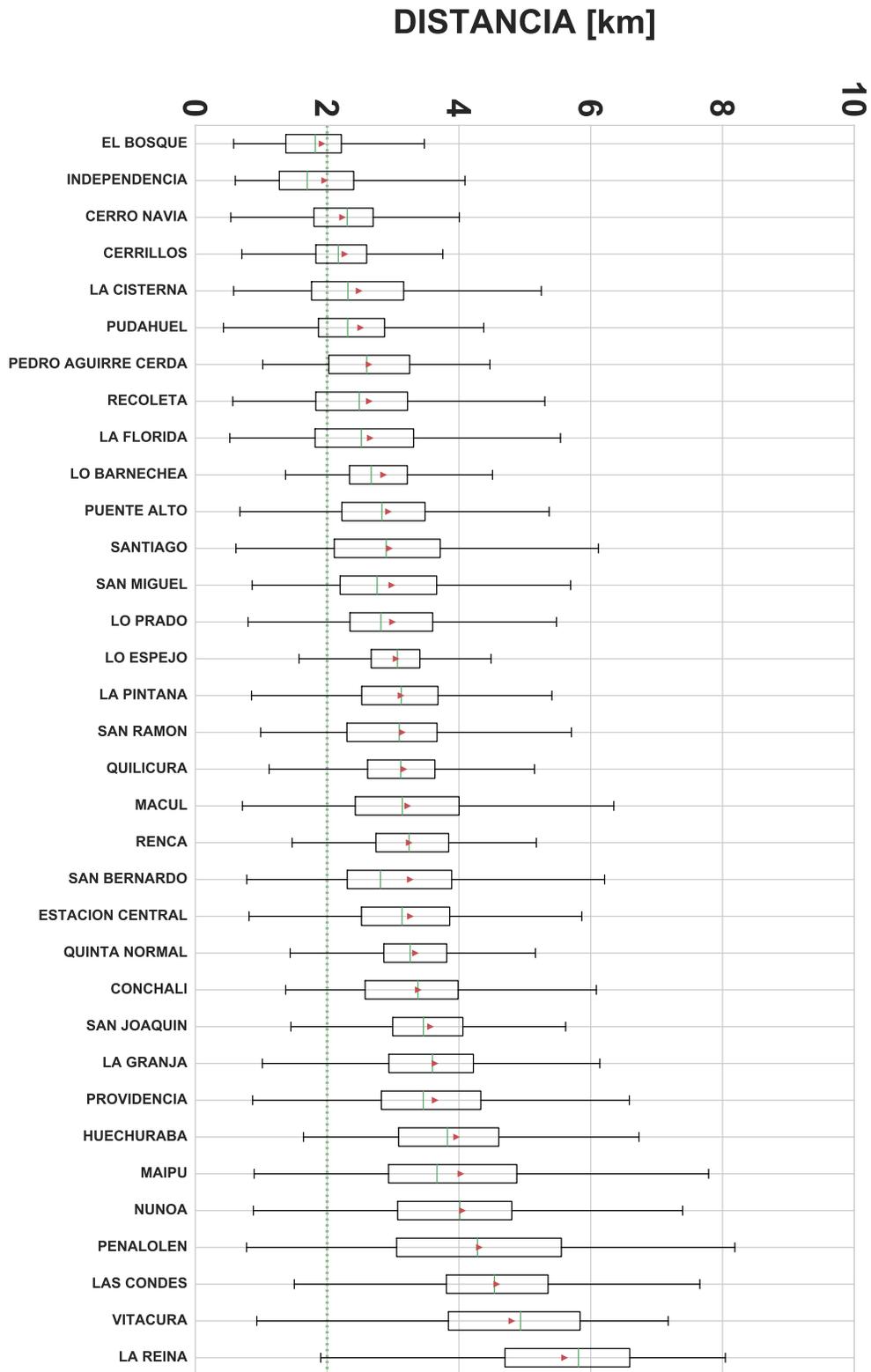


Figura 4.12: Distribución de la distancia promedio diaria entre usuario y estación de monitoreo agrupado por comuna de residencia (23 de julio de 2015). Línea punteada verde representa la resolución espacial de CHIMERE de 2 [km]. Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja representan el promedio y la mediana respectivamente

Tabla 4.7: Distancia promedio diaria entre usuario y estación de monitoreo agrupado por comuna de residencia (23 de julio de 2015)

Comuna	Distancia promedio [km]
El Bosque	1,9
Independencia	2
Cerro Navia	2,2
Cerrillos	2,3
La Cisterna	2,5
Pudahuel	2,5
Pedro Aguirre Cerda	2,6
Recoleta	2,6
La Florida	2,7
Lo Barnechea	2,9
Puente Alto	2,9
Santiago	2,9
San Miguel	3
Lo Prado	3
Lo Espejo	3
La Pintana	3,1
San Ramón	3,1
Quilicura	3,2
Macul	3,2
Renca	3,2
San Bernardo	3,3
Estación Central	3,3
Quinta Normal	3,3
Conchalí	3,4
San Joaquín	3,6
La Granja	3,6
Providencia	3,6
Huechuraba	4
Maipú	4
Ñuñoa	4,1
Peñalolén	4,3
Las Condes	4,6
Vitacura	4,8
La Reina	5,6

4.2. Exposición calculada con datos de CHIMERE

La presente sección expone los resultados calculados utilizando como base de datos de $MP_{2,5}$ las salidas del modelo de transporte químico CHIMERE. Este modelo fue validado para el caso de Santiago con salidas de resolución espacial de 2×2 [km] y resolución temporal de 1 [h] en el trabajo de Mazzeo et al. (2018).

La exposición a $MP_{2,5}$ se realiza asignando a los usuarios de la muestra (los cuales están asociados a un paradero de transporte público) el punto de grilla más cercano del modelo. Dado que la resolución temporal de la simulación del modelo es horaria al igual que las mediciones en estaciones de monitoreo, se estudia la variabilidad de la exposición en función del tiempo asignando la exposición a los intervalos de concentración de $MP_{2,5}$ presentados en la Figura 4.13. En comparación con la estimación realizada en la sección 4.1, en general las estimaciones con ambas bases de datos presentan las mismas características durante la semana de estudio. Pero, las estimaciones basadas en el modelo presentan una mayor cantidad de usuarios expuestos a niveles más altos de contaminación produciendo peaks horarios de exposición más marcados. Esto se produce por tener una mayor cantidad de valores de concentraciones de $MP_{2,5}$ con valores más altos que los observado en las estaciones.

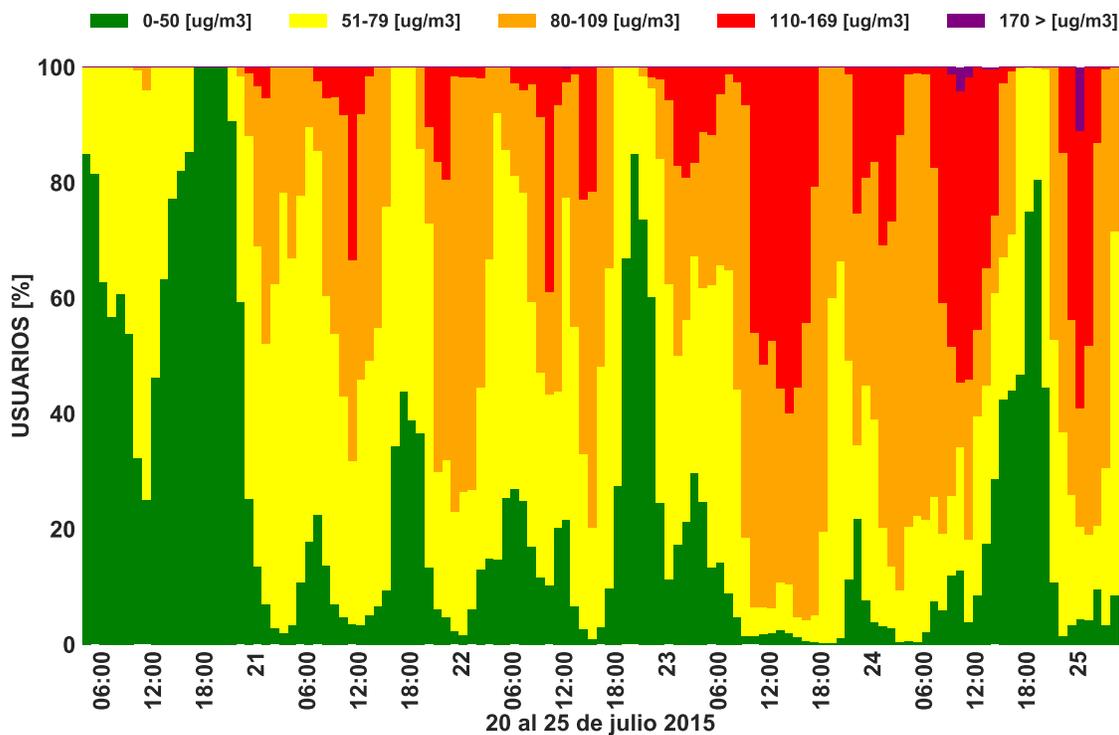


Figura 4.13: Porcentaje de usuarios de transporte público expuestos a $MP_{2,5}$ durante intervalos horarios desde el 20 al 24 de julio de 2015 con datos de CHIMERE. La medianoche se presenta en la posición de la etiqueta del día.

De la Figura 4.13 se observan horarios en que una fracción importante de las personas consideradas en este estudio están expuestas a altas concentraciones de $MP_{2,5}$, especialmente

en el rango entre 80 y 169 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$. Dentro de los períodos de mayor exposición que más se repiten se identifica el mediodía, la madrugada cerca de las 1:00 a.m. y en la tarde alrededor de las 2:00 p.m.

En particular, se observa que el lunes 20 de julio hay solo un peak de exposición a las 11:00 a.m. donde el 4 % de los usuarios experimentaron concentraciones de $\text{MP}_{2,5}$ entre 80 y 109 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ y el 71 % a concentraciones entre 51 y 49 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$. El segundo peak empieza a desarrollarse durante la última hora del día 20 y la madrugada del día 21.

El día 21 de julio se identifican tres peaks: a las 1:00 a.m., a las 11:00 a.m. y a las 10:00 p.m. Durante el primer peak, el 5 % de los usuarios experimentaron niveles de calidad de aire entre 110 y 169 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ y el 43 % entre 80 y 109 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$. En el segundo peak, el 35 % de los usuarios estuvieron expuestos entre 80 y 109 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ y el 33 % entre 110 y 169 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$. En el tercer peak durante la noche, 19 % de los usuarios estuvieron expuestos a concentraciones entre 110 y 169 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ y 49 % entre 80 y 109 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$.

Antes del mediodía del día 22 de julio, a las 10:00 a.m., se observa que el 39 % de los usuarios se encuentra expuesto a entre 110 y 169 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ y el 18 % entre 80 y 109 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$. Desde las 2:00 p.m. hasta las 4:00 p.m. se observa otro peak de exposición donde cerca del 22 % de los usuarios se encuentran expuestos en promedio a entre 80 y 109 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ y el 51 % entre 110 y 169 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$.

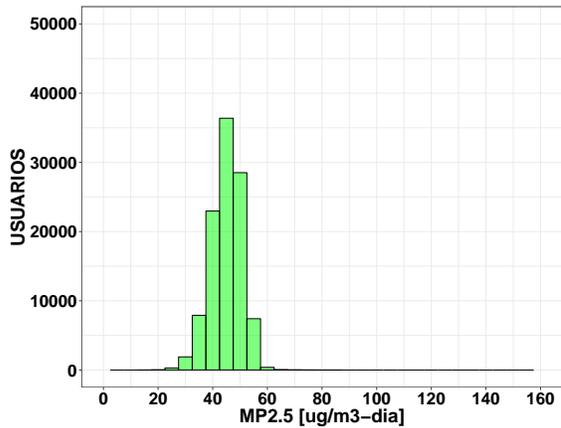
El peak nocturno se observa en la madrugada del día 23 de julio entre las 1:00 y las 2:00 a.m. donde el 19 % de los usuarios reportaron niveles de exposición entre 110 y 169 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ y el 25 % entre 80 y 109 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$. Al igual que en días anteriores, se observan dos peaks: uno a las 11:00 a.m. y otro a las 2:00 p.m. nuevamente. En el primero, el 52 % de los usuarios experimentan exposiciones entre 110 y 169 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ y 42 % entre 80 y 109 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$. En cambio, el segundo es aún más pronunciado con un 60 % de los usuarios expuestos a concentraciones de $\text{MP}_{2,5}$ entre 110 y 169 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ y 30 % entre 80 y 109 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$. Además, se identifica un alza en la exposición a las 10:00 p.m. donde el 25 % de los usuarios experimentan concentraciones entre 110 y 169 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ y el 40 % entre 80 y 109 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$.

El día 24 de julio presenta los peaks de exposición más altos del período de estudio. Al igual que en días anteriores, se observa un primer período punta de exposición a las 1:00 a.m. donde el 80 % de los usuarios se encuentra en niveles de exposición entre 80 y 169 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$. El segundo peak ocurre a las 10:00 a.m. y es el más alto con un 4 % de los usuarios expuestos a concentraciones sobre los 170 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$, 51 % entre 110 y 169 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ y 11 % entre 80 y 109 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$. El peak nocturno en la medianoche donde el 79 % de los usuarios se encuentran expuestos a entre 80 y 169 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ y el 11 % restante a concentraciones sobre los 170 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$.

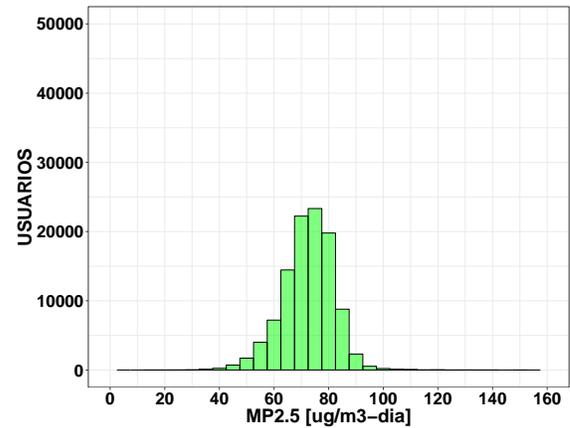
La distribución de la concentración promedio de $\text{MP}_{2,5}$ durante 24 horas continuas a la que están expuestos los usuarios muestra los valores más frecuentes de exposición para cada día estudiado (ver Figura 4.14). Para el día lunes 20, alrededor de 36.000 personas están expuestas a 45 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$, 23.000 a 75 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ el día 21, 21.000 usuarios a 70 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ el día 22, 18.000 a 85 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ el día 23, 15.000 usuarios a 95 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ el día viernes 24.

El promedio ponderado de las exposiciones mostradas en los histogramas entrega como resultado la exposición promedio de los usuarios frecuentes de transporte público. Al com-

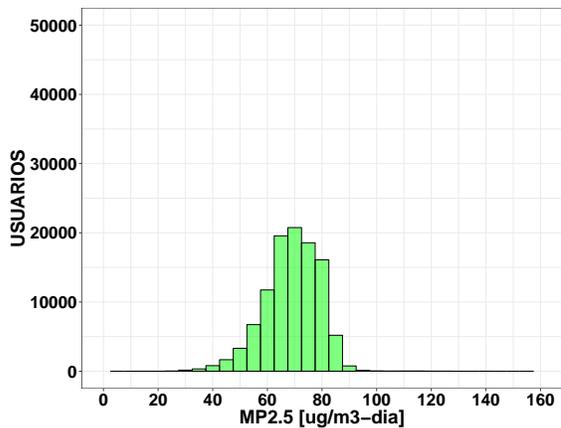
parar el valor de exposición promedio a partir de datos de CHIMERE con la exposición calculada con datos de las estaciones de monitoreo (ver Tabla 4.8), se observa una mayor diferencia en los días con mayores niveles de contaminación (23 y 24 de julio de 2015) que en aquellos menos contaminados. CHIMERE sobreestima la exposición en los días 20, 23 y 24 y la subestima en el resto.



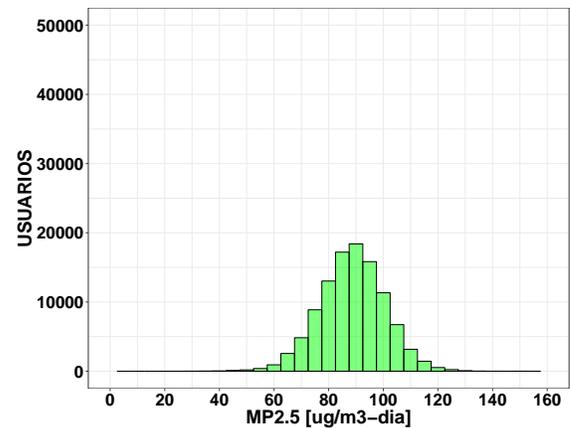
(a) 20 de julio de 2015



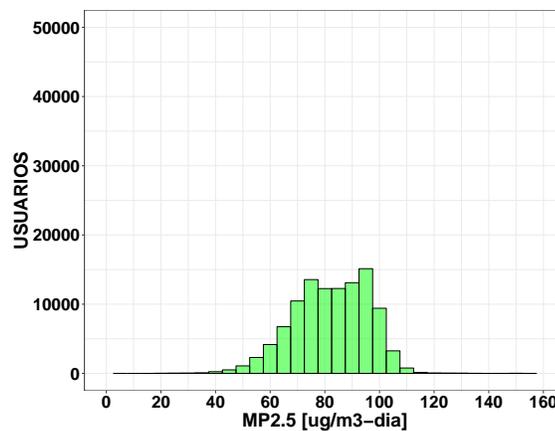
(b) 21 de julio de 2015



(c) 22 de julio de 2015



(d) 23 de julio de 2015



(e) 24 de julio de 2015

Figura 4.14: Histogramas de usuarios expuestos a $MP_{2,5}$ con datos de CHIMERE.

Sin embargo, para identificar el sesgo del modelo se aplicó la metodología en la posición de las estaciones de monitoreo con el valor de concentración más cercano de las salidas de CHIMERE (ver Figura 4.15). El sesgo asociado al error del modelo se determina como la diferencia, en términos de exposición, entre el valor calculado con las observaciones de las estaciones de monitoreo (columna EM en la Tabla 4.8) y el valor calculado con las simulaciones de CHIMERE en la posición de las estaciones (columna EM CHIMERE en la Tabla 4.8). En particular, la exposición calculada con las simulaciones en la posición de las estaciones subestima la exposición calculada con las observaciones en los días 20, 21 y 22 por lo que los valores de concentraciones de CHIMERE deben ser más bajos que lo observado en estos días. Además, en los días 23 y 24 las concentraciones modeladas deben ser superiores a lo observado.

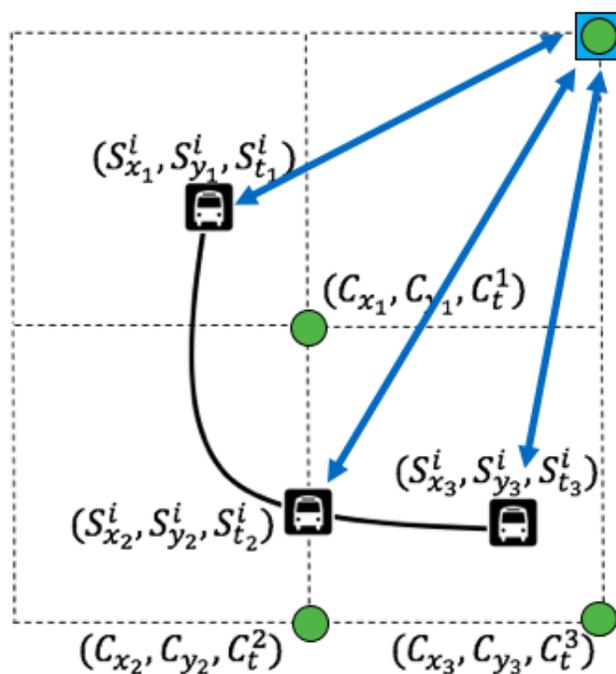


Figura 4.15: Aplicación de la metodología a datos de CHIMERE (círculo verde) en la posición de la estación de monitoreo (cuadrado azul).

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.8: Exposición promedio diaria a $MP_{2.5}$ calculada con datos de estaciones de monitoreo (EM), con CHIMERE y con observaciones sintéticas simuladas por CHIMERE en la posición de las estaciones (EM CHIMERE)

Día	Exposición promedio (EM) [$\mu g/m^3$]	Exposición promedio (CHIMERE) [$\mu g/m^3$]	Exposición promedio (EM CHIMERE) [$\mu g/m^3$]
20	44	45	43
21	75	72	69
22	73	69	66
23	73	89	86
24	67	82	81

Al comparar las columnas de exposición calculada con CHIMERE (segunda columna de la Tabla 4.15) con la calculada con CHIMERE en la posición de las estaciones (tercera columna de la Tabla 4.15) no existe el sesgo del modelo al ser ambos valores de exposición calculados a partir de las simulaciones. En este caso, lo que se identifica al comparar ambas columnas es el efecto de la variabilidad espacial de las concentraciones que otorga la grilla de CHIMERE en el cálculo de la exposición promedio de los usuarios frecuentes de transporte público. En cada uno de los días considerados, el cálculo de la exposición utilizando solo las concentraciones en la posición de la red de monitoreo actual subestimaría la exposición de los usuarios a $MP_{2,5}$. Dado esto, es más probable que la exposición calculada con la grilla de CHIMERE sea más realista al emular una red de monitoreo más densa que la red actual disponible en la ciudad.

Como se ha mencionado en el Capítulo 3.1, en la semana del lunes 20 al viernes 24 de julio de 2015 se decretaron 4 episodios medioambientales: dos episodios de Alerta (21 y 23) y 2 episodios de Preemergencia (22 y 24). Los episodios son declarados el día anterior por la Intendencia a partir de información entregada por el MMA y otros organismos.

Al igual que en la Sección 4.1, la Tabla 4.9 muestra la cantidad de usuarios asignados a los distintos niveles de concentración que representan los episodios medioambientales. Además del pronóstico, se adjunta el promedio de concentración más alto modelado en la posición de las estaciones de monitoreo en la columna EM CHIMERE.

Tabla 4.9: Porcentaje de usuarios expuestos a los niveles establecidos por la norma primaria de calidad de aire para $MP_{2,5}$ calculado con datos de CHIMERE

Día	Bueno	Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia	Pronóstico	Estimado (EM CHIMERE)
20	82 %	18 %	0 %	0 %	0 %	-	Bueno
21	2 %	75 %	24 %	0 %	0 %	Alerta	Alerta (P. O'Higgins)
22	4 %	80 %	16 %	0 %	0 %	Preemergencia	Alerta (Pudahuel)
23	1 %	22 %	73 %	5 %	0 %	Alerta	Alerta (P. O'Higgins)
24	1 %	39 %	58 %	1 %	0 %	Preemergencia	Alerta (Pudahuel)

La exposición promedio diaria calculada en base a simulaciones de la dispersión de $MP_{2,5}$ en Santiago muestra que los días 21 y 23 de julio de 2015, el 24 % (31.677) y el 73 % (13.727) de los usuarios presenta niveles de Alerta respectivamente. El día 22 no se reportaron casos en estado de Preemergencia con el modelo, aunque sí el día 23 y 24 con un 5 % (5.280) y 1 % (1.056) de los usuarios respectivamente (ver Tabla 4.9). La cantidad de usuarios estimados en estado de Preemergencia es distinta a la calculada con datos de estaciones de monitoreo (ver Tabla 4.1), el cual reporta que el día 21 el 2 % de los usuarios frecuentes de transporte público se encontraron en este estado y el día 23 y 24 muestra que nadie se encontraba expuesto a niveles de Preemergencia y solo el 13 % y 19 % a Alerta. Las diferencias son una consecuencia del sesgo que tiene el modelo y a priori no se puede determinar cual asignación es correcta, ya que no es claro si el modelo subestima o sobreestima la exposición en comparación con las estaciones.

Los resultados con datos de CHIMERE también muestran relaciones entre exposición y las actividades hogar, trabajo, estudio, viaje y otros (ver Figuras 4.16, 4.17 y Anexos A.4 a A.8). La variabilidad de la exposición de los usuarios durante las diferentes actividades muestra que la actividad otros es la de mayor variabilidad intracomunal (ver Figura A.8) y la actividad que presenta la menor variabilidad intrazonal es la actividad hogar (ver Figura A.4). En cuanto a las actividades trabajo y estudio, estas no presentan variabilidad entre comunas cuando se agrupan a los usuarios por comuna de residencia a excepción de los residentes de Lo Barnechea (ver Figuras A.5 y A.6). Esto se debe a que el 67,4 % de los trabajadores y el 68,4 % de los estudiantes que utilizan el sistema de transporte público día a día realizan estas actividades en las comunas de Santiago, Providencia y Las Condes en jornadas similares (ver Matrices Origen-Destino A.3 y A.4). No obstante, al estimar la exposición por comuna de trabajo y estudio (ver Figuras A.9 y A.10) se observa que los trabajadores y estudiantes de Santiago y Quinta Normal presentan los niveles más altos de exposición durante la jornada (89 y 88 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] respectivamente) y los de Lo Barnechea y Puente Alto los menores (25 y 40 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] respectivamente).

El 91 % del total de la exposición promedio es asociada a la actividad trabajo (o estudio) y hogar para trabajadores y estudiantes (ver Figuras 4.16 y 4.17). En general, la suma de la exposición en actividades hogar y trabajo (o estudio) es constante y lo que cambia son las contribuciones relativas entre las actividades y el tipo de usuario (ver Tabla 4.10). Mientras mayor sea lo que representa la actividad hogar en la exposición total, menor es la representatividad de la actividad trabajo (o estudio) y viceversa. Esta proporción total se distribuye de la misma forma que al calcular la exposición con datos de estaciones de monitoreo producto de que el tiempo dedicado a las actividades consideradas se mantienen en ambos cálculos. Sin embargo, al compararlas se observan diferencias entre tipos de usuarios y entre bases de datos de $\text{MP}_{2,5}$. En promedio, el porcentaje total de la exposición en trabajadores durante la actividad trabajo es un 5 % mayor al de la exposición hogar al calcularla con CHIMERE (43 % en hogar y 48 % en trabajo). En estudiantes, el porcentaje total de la exposición durante la actividad estudio es un 15 % mayor que en el hogar con CHIMERE (53 % en hogar y 38 % en trabajo) y un 23 % mayor con estaciones de monitoreo (57 % en hogar y 34 % en trabajo). Esto indica que CHIMERE sobreestima la exposición durante la actividad trabajo y estudio y subestima la exposición durante la actividad hogar al compararla con la exposición calculada con las observaciones en las estaciones de monitoreo producto en un 10 % en trabajadores y en un 4 % en estudiantes. Dado esto, los valores de las concentraciones simuladas por CHIMERE en los lugares de trabajo y estudio deben ser mayores (y en hogares menores) que los valores observados en las estaciones de monitoreo más cercanas.

Tabla 4.10: Porcentaje de exposición por actividad, tipo de usuario y base de datos utilizada.

Actividad:	Trabajo o Estudio		Hogar	
	CHIMERE	EM	CHIMERE	EM
Tipo de usuario				
Trabajador	48 %	38 %	43 %	53 %
Estudiante	38 %	34 %	53 %	57 %

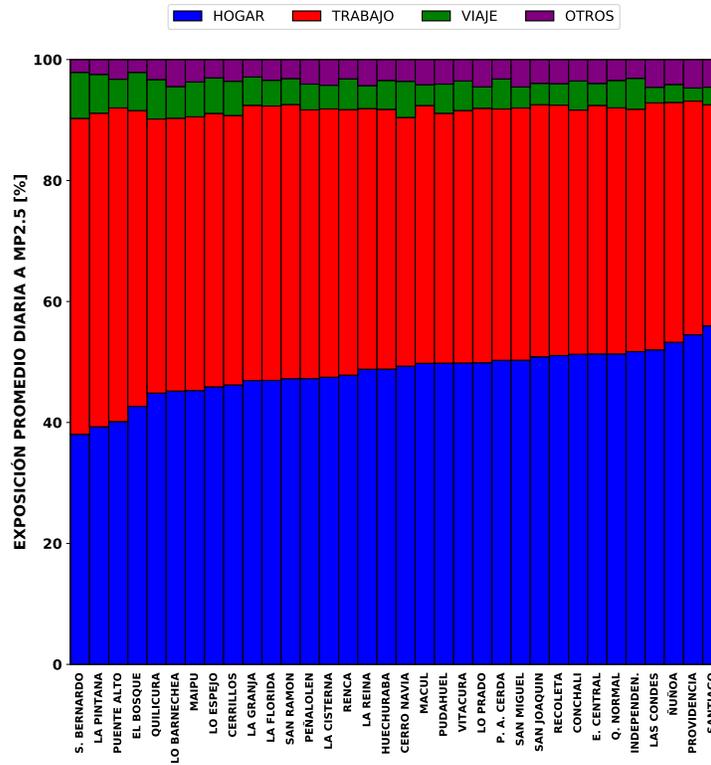


Figura 4.16: Porcentaje de exposición que aporta cada actividad en la exposición promedio diaria a MP_{2.5} en trabajadores con datos de CHIMERE

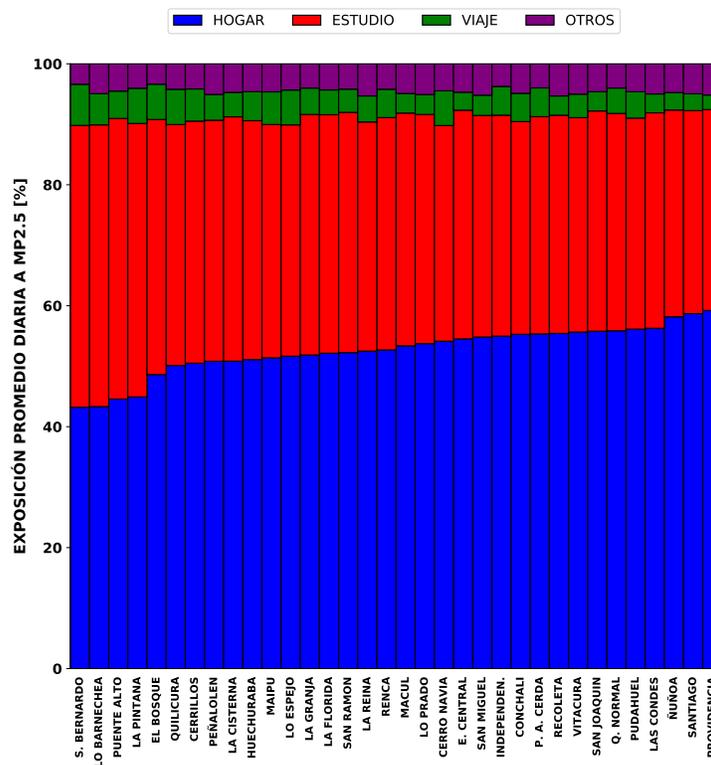


Figura 4.17: Porcentaje de exposición que aporta cada actividad en la exposición promedio diaria a MP_{2.5} en estudiantes con datos de CHIMERE

Los resultados de aplicar la metodología propuesta con datos del modelo agregados por comuna de residencia agrupando todas las actividades muestran cómo aumenta la exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ en los usuarios frecuentes de transporte público a medida que transcurre la semana analizada caracterizada por mala calidad del aire (ver Figuras 4.18 a 4.22). En comparación con los resultados con la información de estaciones de monitoreo, la variabilidad intercomunal de la exposición es más baja y la variabilidad intracomunal más alta. La baja variabilidad entre residentes de las comunas provoca que las mayores exposiciones se encuentren en distintas comunas de Santiago. En cambio, la alta variabilidad intracomunal permite que los usuarios experimenten distintos niveles de exposición dentro de la misma comuna de residencia. Ambos impactos en la variabilidad son consecuencias de la resolución espacial de las salidas del modelo CHIMERE. En general, los residentes de las comunas de Las Condes, Pudahuel, Ñuñoa y Cerro Navia experimentaron las mayores exposiciones promedio diarias y los residentes de Lo Barnechea fueron los menos afectados durante todo el período.

En particular, durante el día 20 de julio los residentes de las comunas de Las Condes, Santiago, Providencia y Ñuñoa presentaron los niveles de exposición promedio más altos con concentraciones entre 50 y 48 $[\mu g/m^3]$. Los mínimos se observaron en las comunas de Lo Barnechea, Quilicura, La Pintana y San Bernardo con exposiciones entre 37 y 38 $[\mu g/m^3]$. La variabilidad de la exposición en torno al promedio durante este día se observa baja entre comunas con una desviación estándar que ronda los 4 a 6 $[\mu g/m^3]$.

El día 21 y 22 de julio los habitantes de Pudahuel, Lo Prado, Pedro Aguirre Cerda, San Miguel y Santiago percibieron las mayores exposiciones promedio con concentraciones entre 78 y 77 $[\mu g/m^3]$. La variabilidad más alta se observa en los residentes de Pudahuel, Lo Barnechea, La Reina y Maipú con desviaciones estándar de 11, 10, 10 y 9 $[\mu g/m^3]$ respectivamente. Las mínimas exposiciones promedio se encontraron en Lo Barnechea, Quilicura y San Bernardo con 47, 59 y 59 $[\mu g/m^3]$ respectivamente. Además, se observa que los residentes de Las Condes, Lo Barnechea y La Reina poseen las desviaciones estándar más altas del orden de 11 $[\mu g/m^3]$.

Durante el día 23 de julio se presentan los residentes más afectados del período en estudio en las comunas de Ñuñoa, Providencia, San Miguel y Santiago con exposiciones promedio de 98, 97, 96 y 96 $[\mu g/m^3]$ respectivamente. Los habitantes de Lo Barnechea, Puente Alto y La Pintana figuran como los menos afectados por las concentraciones de $MP_{2,5}$ con niveles de exposición promedio de 63, 73 y 74 $[\mu g/m^3]$ respectivamente. En este día la desviación estándar más alta se observa en Lo Barnechea (14 $[\mu g/m^3]$), mientras que en las demás comunas la desviación se mueve entre los 9 y 11 $[\mu g/m^3]$ con respecto a la media.

El 24 de julio se observan las exposiciones promedio más altas en Cerro Navia, Pudahuel y Conchalí con 92, 92 y 89 $[\mu g/m^3]$ respectivamente. Los residentes menos afectados se observan en Lo Barnechea, Puente Alto y San Bernardo con exposiciones promedio de 42, 68 y 70 $[\mu g/m^3]$ respectivamente. En este día se reporta la mayor variabilidad con desviaciones estándar entre 10 y 18 $[\mu g/m^3]$, donde se identifica la variabilidad más alta en Lo Barnechea, La Reina y Peñalolén.

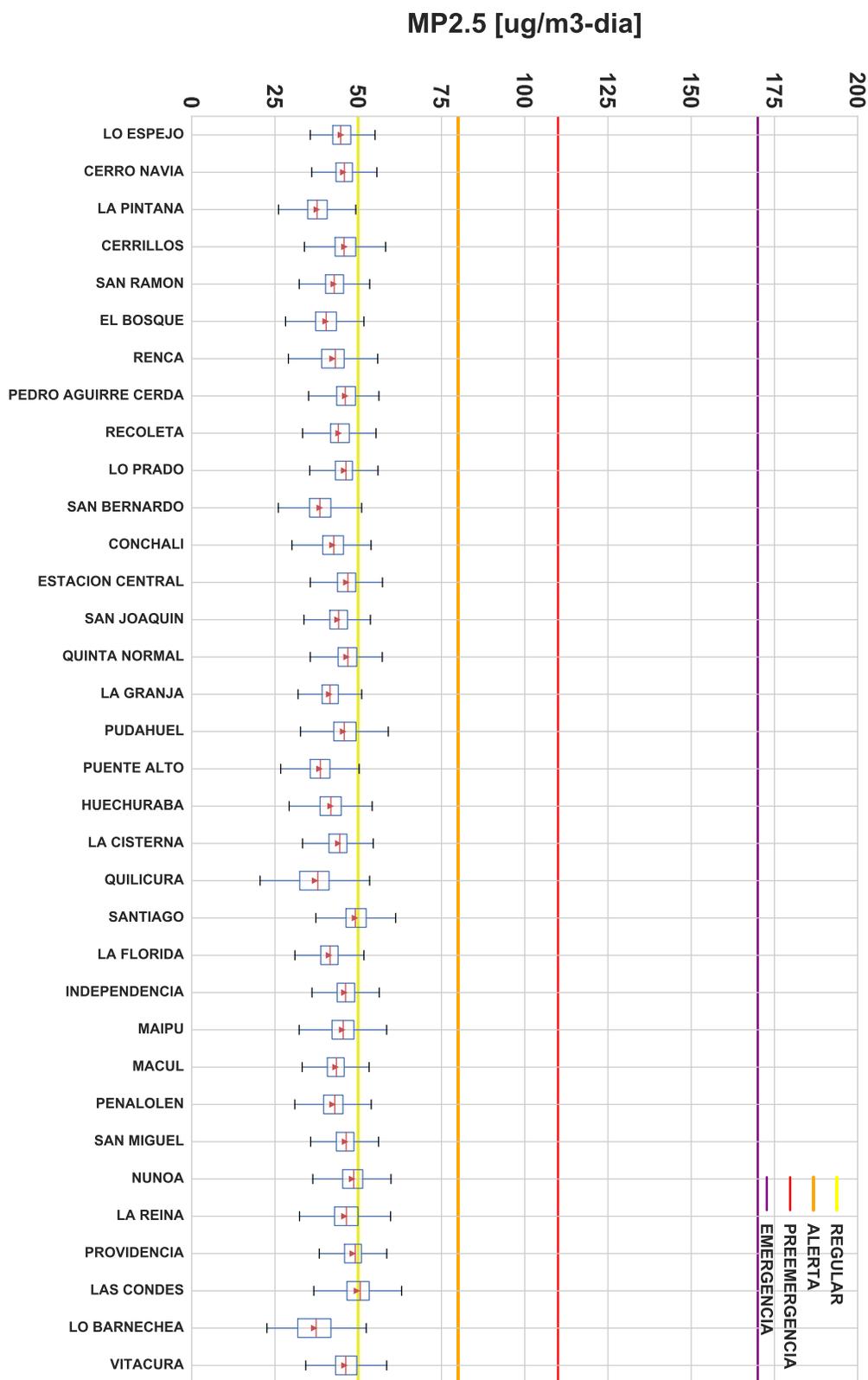


Figura 4.18: Distribución de la exposición promedio diaria a MP_{2,5} agrupado por comuna de residencia (20 de julio de 2015) con datos de CHIMERE. Líneas representan la cota inferior para declarar episodio Regular (50 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]), Alerta (80 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]), Preemergencia (110 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]) y Emergencia (170 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]). Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja son el promedio y la mediana respectivamente

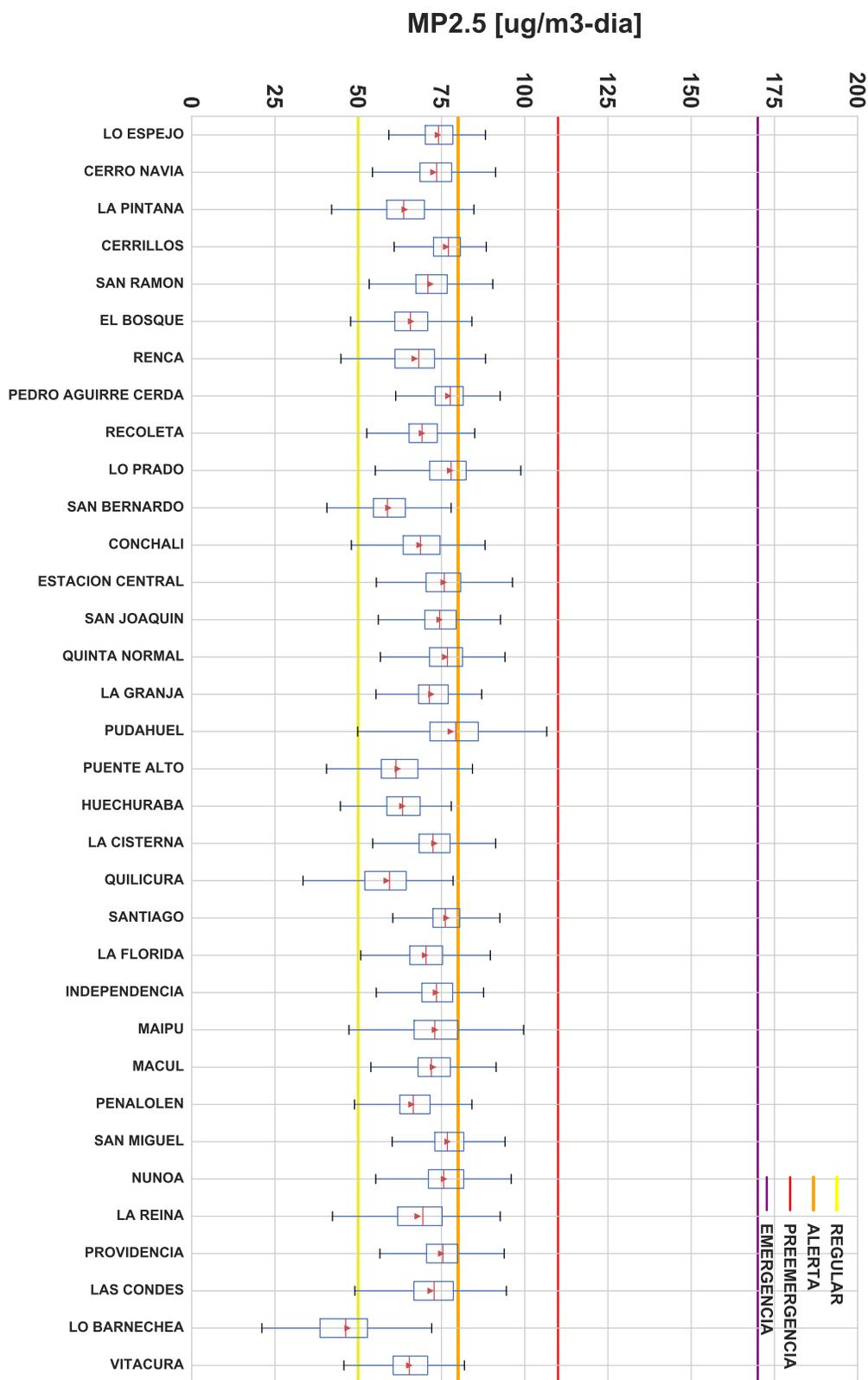


Figura 4.19: Distribución de la exposición promedio diaria a $\text{MP}_{2,5}$ agrupado por comuna de residencia (21 de julio de 2015) con datos de CHIMERE. Líneas representan la cota inferior para declarar episodio Regular ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Alerta ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Preemergencia ($110 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Emergencia ($170 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja son el promedio y la mediana respectivamente

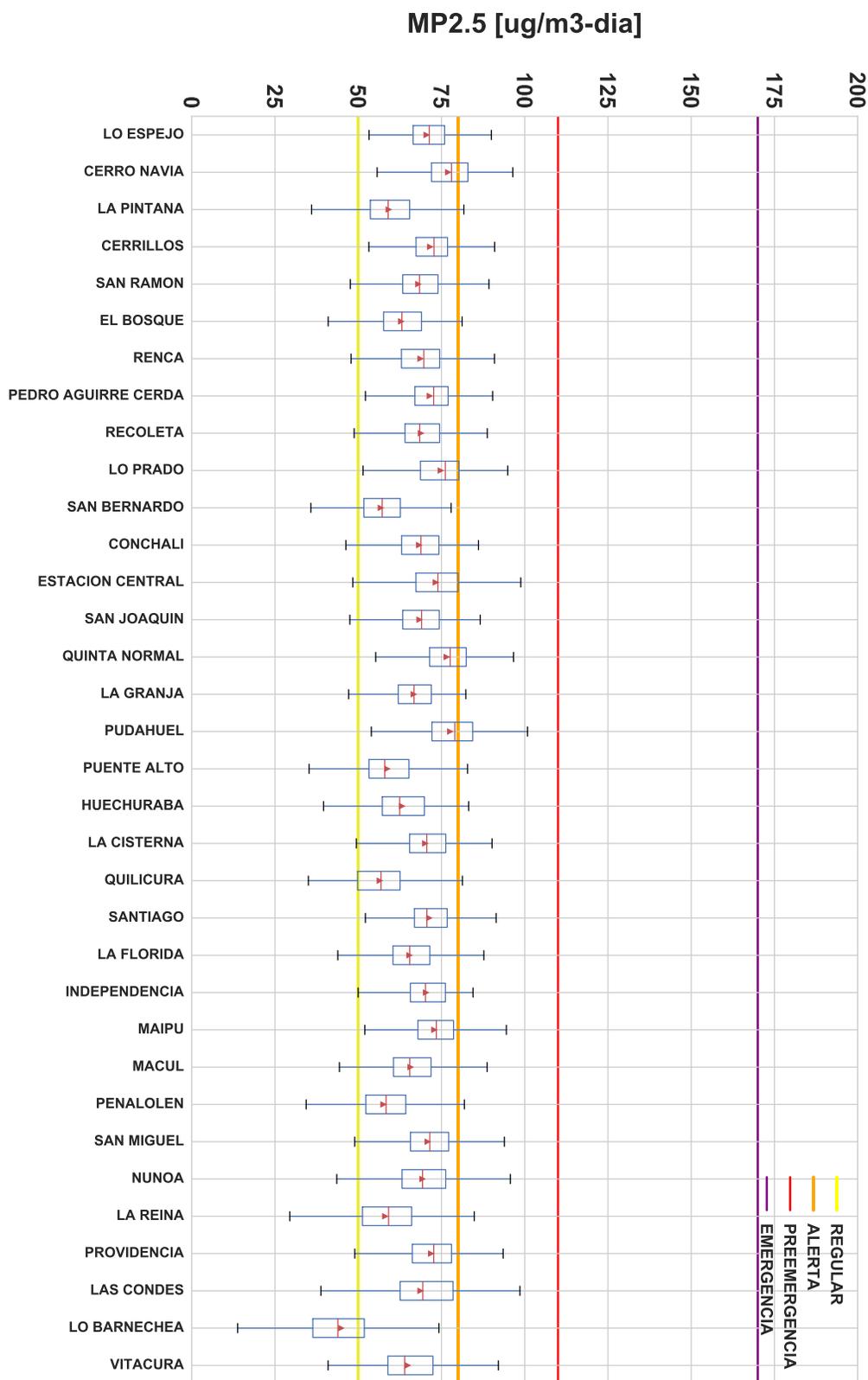


Figura 4.20: Distribución de la exposición promedio diaria a $\text{MP}_{2,5}$ agrupado por comuna de residencia (22 de julio de 2015) con datos de CHIMERE. Líneas representan la cota inferior para declarar episodio Regular ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Alerta ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Preemergencia ($110 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Emergencia ($170 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja son el promedio y la mediana respectivamente

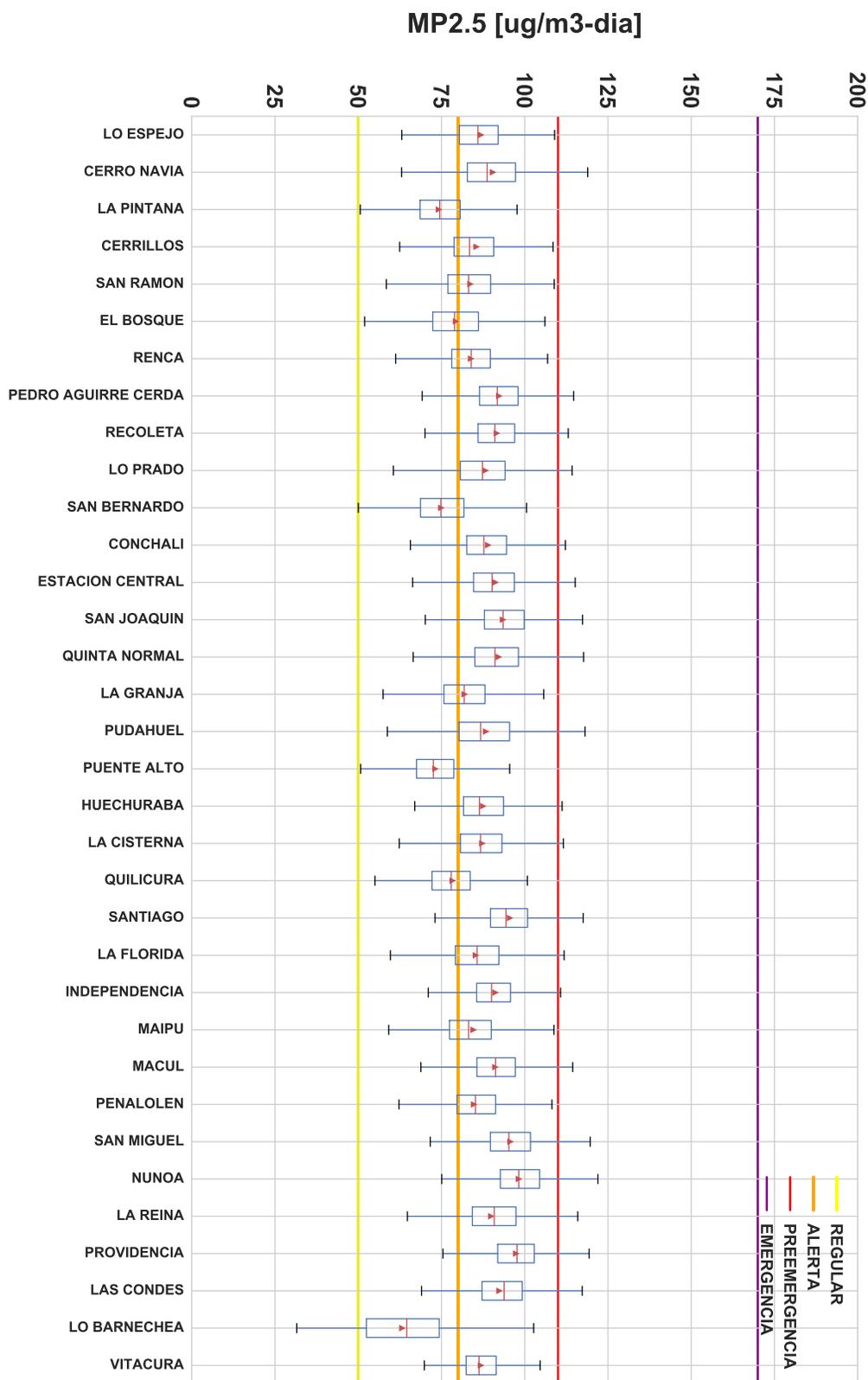


Figura 4.21: Distribución de la exposición promedio diaria a $\text{MP}_{2.5}$ agrupado por comuna de residencia (23 de julio de 2015) con datos de CHIMERE. Líneas representan la cota inferior para declarar episodio Regular ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Alerta ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Preemergencia ($110 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Emergencia ($170 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja son el promedio y la mediana respectivamente



Figura 4.22: Distribución de la exposición promedio diaria a $\text{MP}_{2,5}$ agrupado por comuna de residencia (24 de julio de 2015) con datos de CHIMERE. Líneas representan la cota inferior para declarar episodio Regular ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Alerta ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Preemergencia ($110 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Emergencia ($170 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja son el promedio y la mediana respectivamente

Al igual que en la Sección 4.1, con los datos de exposición promedio semanal a $MP_{2,5}$ calculadas con CHIMERE, el ingreso monetario promedio por comuna y el IDSE se calcularon regresiones lineales para determinar la correlación entre comuna de residencia y exposición (ver Figura 4.23). En ambos casos la variable no es significativa (ver Tablas 4.11 y 4.12). La regresión en función de la variable ingreso monetario posee un R^2 de 0,04 con un error cercano al coeficiente de la variable. La regresión en función del IDSE solo alcanza un R^2 de 0,02 con errores que superan el valor del coeficiente. Sin embargo, existe un cúmulo de puntos en el rango menor a los \$1.500.000 por lo que se realizó una regresión segmentada. La regresión segmentada separando la variable ingreso se adjunta en Anexos (ver Figura A.3 y Tablas A.8 y A.9). A partir de esta segmentación, el ajuste solo es mejor para los residentes de comunas de ingreso monetario sobre \$1.500.000 ($R^2 = 0,26$), pero la variable sigue siendo no significativa para los usuarios de comunas de ingreso monetario menor a \$1.500.000 ($\beta = -2,19 \times 10^{-6}$; $\varepsilon = -5,76 \times 10^{-6}$; $R^2 = 0,006$).

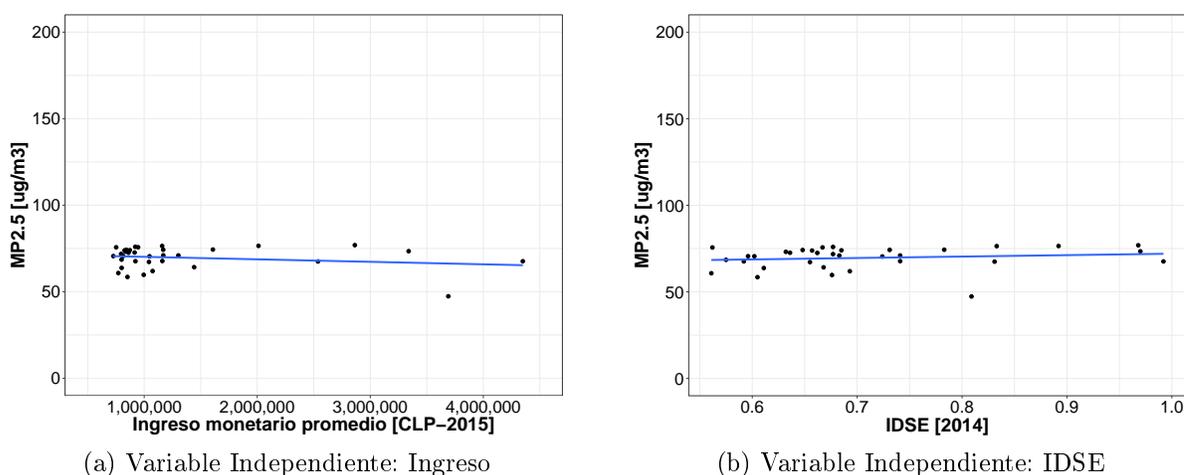


Figura 4.23: Regresiones lineales simples en la variable dependiente es la exposición promedio semanal a $MP_{2,5}$ por comuna de residencia con datos de CHIMERE

Tabla 4.11: Parámetros de la regresión aplicado al ingreso con datos de CHIMERE

Variable	Coefficiente	Error Est.	Test-T	R^2
Ingreso	$-1,44 \times 10^{-6}$	$1,21 \times 10^{-6}$	-1,18	0,04
Intercepto	71,58	1,98	36,2	

Tabla 4.12: Parámetros de la regresión aplicado al IDSE con datos de CHIMERE

Variable	Coefficiente	Error Est.	Test-T	R^2
IDSE	8,26	9,63	0,857	0,02
Intercepto	63,79	6,89	9,25	

Capítulo 5

Discusión

El presente capítulo discute en términos generales los principales resultados sobre la estimación de la exposición (Sección 5.1) y los supuestos de la metodología presentada (Sección 5.2). Luego, presenta el potencial que posee el modelo para evaluar políticas medioambientales (Sección 5.3) para finalmente mostrar una aplicación de evaluación de política medioambiental basada en el trabajo remoto durante episodios medioambientales (Sección 5.4).

5.1. Análisis de resultados entre bases de datos

Los principales resultados presentados en este trabajo muestran cómo la exposición a $MP_{2,5}$ depende de factores como la base de datos de contaminación y la movilidad del usuario. Al comparar los resultados utilizando las observaciones de la red de monitoreo con los resultados en base a las estimaciones del modelo CHIMERE se identifican diferencias importantes en términos de exposición.

En primer lugar, se encontraron diferencias entre ambas bases de datos en cuanto al instante de mayor exposición de los usuarios durante el día. Las mayores exposiciones horarias resultadas de la aplicación a los datos de la red de monitoreo se encontraron en general a las 8:00 a.m. y 11:00 p.m. mientras que con CHIMERE la exposición aumenta un par de horas más tarde a las 11:00 a.m., 2:00 p.m. y 1:00 a.m. Esto indica que los valores de las concentraciones calculadas por el modelo son mayores que las concentraciones observadas en los períodos peak de exposición de CHIMERE y menores que las observaciones en los períodos peak de exposición medidos en las estaciones.

Se observaron diferencias en la contribución de las actividades hogar, trabajo y estudio principalmente entre ambas bases de datos y tipos de usuario. En general, ambas bases de datos concuerdan en que el porcentaje total de exposición en trabajadores es mayor que la de estudiantes durante la jornada laboral y menor durante actividades basadas en el hogar. Lo anterior ocurre dado que los estudiantes frecuentes de transporte público pasan más tiempo en el hogar y menos tiempo en sus lugares de estudio que los trabajadores en sus hogares y puestos de trabajo. Para el escenario de CHIMERE, la exposición en trabajadores durante la

actividad trabajo es un 10 % mayor que la actividad estudio y 10 % menor que la actividad hogar en comparación con estudiantes. Para el caso de las estaciones de monitoreo, la exposición en trabajadores mientras ejercen su trabajo es un 4 % mayor que la actividad estudio y 4 % menor que la actividad hogar en estudiantes. Considerando que el 70 % de las actividades relacionadas con el trabajo/estudio se ejecutan en las comunas de Santiago, Providencia y Las Condes y que el uso de tiempo no varía entre bases de datos de contaminación, entonces las concentraciones de CHIMERE son mayores en los lugares de trabajo/estudio y menores en los hogares que lo observado en las estaciones de monitoreo más cercanas.

En ambas bases de datos se obtuvieron valores de la exposición promedio por día para usuarios frecuentes de transporte público de Santiago. En el caso de las estaciones de monitoreo, la exposición promedio diaria para los días 20 al 24 de julio resultante fue de 44, 75, 73, 73 y 67 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]. Para CHIMERE, la exposición fue de 45, 72, 69, 89 y 82 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]. Para comparar estos valores, se calculó la exposición promedio diaria utilizando como fuente la localización de las estaciones de monitoreo y los valores de concentraciones de CHIMERE en la posición de las estaciones. La exposición promedio diaria en este caso fue de 43, 69, 66, 86 y 81 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] la cual es distinta a la exposición calculada solo con datos de las estaciones de monitoreo y siempre menor que la exposición estimada con CHIMERE en una grilla de 2 [km]. La diferencia entre los resultados de las estaciones y los resultados de CHIMERE en la posición de las estaciones es específicamente el sesgo que tiene el modelo en reproducir las observaciones en la ubicación de la red, ya que si no existiera este sesgo, los resultados deberían ser iguales. La diferencia entre los resultados de CHIMERE y los resultados del modelo en la ubicación de las estaciones eliminan el sesgo del modelo y muestran el impacto de la distribución espacial de la red de monitoreo actual en el cálculo de la exposición de los usuarios frecuentes de transporte público. En el universo de CHIMERE, el cálculo de la exposición solo con la red de monitoreo subestimaría la exposición promedio diaria al ser menor que la exposición calculada con la grilla.

A partir de la exposición promedio diaria de cada usuario, se realizaron asignaciones a los niveles de concentración de $\text{MP}_{2,5}$ establecidos para decretar episodios medioambientales según la norma primaria. En ambas bases de datos se encontraron usuarios expuestos a niveles de Preemergencia en días en que el pronóstico fue de Alerta ambiental (21 y 23 de julio de 2015 para estaciones de monitoreo y CHIMERE respectivamente). Además, en el día 22 se estimó que ningún usuario estuvo expuesto a concentraciones promedio sobre los 109 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] con ambas bases de datos a pesar de que ese día se haya declarado Preemergencia ambiental. Esta calidad de información no se encuentra disponible en el estado del arte actual de la exposición en habitantes de Santiago y es calculable gracias al método de estimación propuesto.

Al calcular la exposición promedio por comuna de residencia se encontraron diferencias entre las bases de datos de contaminación en términos de la variabilidad de la exposición de los residentes de la misma comuna (intracomunal) y la variabilidad de la exposición de los habitantes de diferentes comunas (intercomunal). Las estimaciones en base a las observaciones en las estaciones de monitoreo arrojan una alta variabilidad intercomunal y una baja variabilidad intracomunal. En cambio, CHIMERE indica una baja variabilidad intercomunal y una alta variabilidad intracomunal. En este caso, es más probable que los resultados de la metodología aplicada a los datos de CHIMERE sean más realistas al incorporar la variabilidad

espacial de las concentraciones en comunas de gran superficie, donde es poco probable que todos los habitantes de la misma comuna estén expuestos a los mismos niveles de $MP_{2,5}$ sin importar la ubicación espacial de sus hogares. La variabilidad intercomunal es más discutible, ya que en CHIMERE se observan mayores niveles de exposición en la actividad trabajo/estudio y menores en la actividad hogar que con datos de las estaciones de monitoreo. Dado lo anterior, los resultados de exposición promedio diaria de las estaciones están más influenciados por la localización del hogar que por el lugar de trabajo y los resultados de CHIMERE están más influenciados por las concentraciones en las comunas céntricas donde se localizan la mayoría de los trabajos. Cabe mencionar que la ubicación de las estaciones de monitoreo se encuentran alejadas del centro de actividades de la población (Santiago, Providencia), por lo que si es probable que exista una subestimación de los niveles de $MP_{2,5}$ en estas comunas al asociar a los usuarios a estaciones alejadas durante la actividad trabajo/estudio.

La correlación entre exposición, ingreso monetario e IDSE para ambas bases de datos de contaminación también entregaron diferencias. En el caso del cálculo de la exposición con estaciones de monitoreo, el ingreso y el IDSE es una variable significativa de relación inversa, tal que a mayor ingreso (e IDSE) menor exposición. En cambio, con CHIMERE la variable ingreso y el IDSE no es significativa por lo que no existiría la relación planteada. Dadas las diferencias planteadas, es probable que la correlación entre exposición e ingreso (e IDSE) sea producto de la distribución actual de la red de monitoreo de calidad del aire y no de las condiciones reales a las que están expuestos los usuarios frecuentes de transporte público.

5.2. Supuestos y consideraciones

Los resultados de la aplicación de la metodología a las bases de datos de contaminación dependen de los supuestos y consideraciones del método. En primer lugar, las concentraciones en interiores se consideraron iguales a las concentraciones en exteriores medidas por las estaciones de monitoreo y estimadas por el modelo de dispersión. Por ello, la incorporación de información sobre concentraciones en interiores produciría cambios en la estimación de la exposición durante las actividades que se realizan dentro de modos de transporte o construcciones llevándolas a una estimación más próxima a la real.

En cuanto a las estimaciones del modelo de dispersión, el modelo considera que dentro de cada celda existe homogeneidad de las concentraciones de $MP_{2,5}$. Es decir, el modelo no captura la variabilidad que existe a nivel de sub-grilla producto del tipo de suelo, condiciones geográficas y ventilación, entre otros factores. Además, existe un sesgo asociado al error del modelo al calcular las concentraciones en la posición de las estaciones de monitoreo que influye directamente en las diferencias encontradas entre las estimaciones de exposición con ambas bases de datos de $MP_{2,5}$.

Las diferencias presentadas en términos de exposición también dependen de la cobertura de la red de monitoreo de calidad de aire y de la resolución del modelo. La red cuenta con 11 estaciones de monitoreo distribuidas en Santiago que buscan monitorear la calidad del aire de 34 comunas. Por ello, se observan residentes de distintas comunas de residencia con exposiciones muy similares producto de que por la metodología propuesta son asignados a la

misma estación. El modelo en cambio ofrece una mayor resolución que la red de monitoreo de calidad del aire al entregar un valor de concentración cada 2 kilómetros. Si se considera que Santiago posee una superficie de 640 [km²], entonces el modelo ofrece alrededor de 150 puntos con valores de concentración de MP_{2,5}, emulando una red de monitoreo más densa que la red actual.

Si bien existe un sesgo del modelo en reproducir las concentraciones observadas de MP_{2,5} en la localización de las estaciones, es más probable que la estimación de la exposición con los datos del modelo CHIMERE se acerque más a la realidad que el cálculo utilizando solo la distribución de la red de monitoreo actual. Lo anterior se debe a la capacidad de entregar una mayor variabilidad espacial de las concentraciones a diferencia de lo que ocurre cuando solo se consideran las 11 estaciones. También, como se ha mencionado anteriormente, al aislar el sesgo del modelo mediante el cálculo de la exposición con los datos de CHIMERE en la ubicación de las estaciones se encontró que el uso de la red como fuente de información subestimaría la exposición. Por ello, el cálculo de la exposición solamente con la red sería insuficiente para estimar una variabilidad espacial realista de las concentraciones y por ende de la exposición.

5.3. Evaluar políticas públicas medioambientales

El gobierno puede decretar medidas medioambientales para mejorar la calidad del aire y proteger la salud de los ciudadanos, las cuales pueden ser evaluadas en términos de exposición si se simulan escenarios incorporando estas medidas. La capacidad del modelo de cuantificar la exposición constituye la etapa previa a la estimación del impacto de la contaminación atmosférica en la salud de la población, lo cual no es posible si se trabaja solamente con las concentraciones de los contaminantes.

La exposición está relacionada con las concentraciones de los contaminantes distribuidos por la ciudad, los cuales varían significativamente en función de las emisiones, geografía y condiciones meteorológicas, entre otros factores. En Santiago, las principales fuentes de MP_{2,5} provienen de motores vehiculares, del sector industrial, de la fundición de cobre, de la quema de leña, de fuentes costeras y de polvo urbano (Barraza et al., 2017). Durante períodos invernales, la principal contribución a MP es por la calefacción residencial y el transporte en calles y carreteras (USACH, 2014).

Para reducir los impactos en la salud del MP_{2,5}, es necesario atacar las fuentes de emisión mencionadas anteriormente. El sector público puede prevenir malas condiciones ambientales al desarrollar e implementar políticas y programas a largo plazo que integren los sectores de transporte, vivienda, energía e industria con el fin de reducir la contaminación atmosférica, mejorar la calidad del aire y prevenir el deterioro del medioambiente (Mickwitz, 2003).

La implementación de políticas medioambientales que atacan a las fuentes de emisión impactan el inventario de emisiones que utiliza el modelo CHIMERE para calcular las concentraciones de MP_{2,5}. La reducción de las emisiones provocan un cambio en los valores de las concentraciones calculadas por el modelo. Una vez que los mapas de concentraciones cam-

bien, los resultados sobre la exposición de la población también cambian. El análisis de los cambios en la exposición, producto del impacto de este tipo de políticas, genera el potencial del modelo propuesto para evaluar la implementación de políticas y la efectividad de ellas en la exposición de los habitantes.

5.4. Trabajar desde el hogar

Esta sección plantea la evaluación de una política medioambiental que no se basa en cambiar las emisiones. En cambio, se evalúa el efecto que tendría que las personas puedan trabajar en sus casas (*teleworking*). Esta forma de trabajar reduce el daño al medioambiente por la disminución de la congestión al no realizar viajes, disminuye el uso de infraestructura y energía en los lugares de trabajo y protegería a las personas de la exposición en sectores más contaminados que sus hogares (Harpaz, 2002).

El cálculo asociado a este ejercicio considera que los usuarios se comportan de manera estática manteniendo su posición en el paradero asociado a la comuna de residencia. El análisis viene dado por las diferencias en términos de exposición entre la exposición promedio diaria calculada considerando la movilidad del usuario por ir al trabajo y que el usuario se mantiene en el hogar durante todo el día para realizar las actividades laborales de forma remota.

La distribución de las diferencias durante la jornada laboral del día 23 de julio de 2015 muestra que si la diferencia en términos de exposición es negativa, la exposición es menor al trabajar desde el hogar, en cambio, si la diferencia es positiva es conveniente trabajar en el puesto de trabajo (ver Figura 5.1). En este caso, los residentes de las comunas céntricas son los más perjudicados en trabajar desde el hogar y los residentes de comunas periféricas son los más beneficiados. Sin embargo, los residentes de Independencia y Pudahuel son indiferentes (ver Tablas 5.1 y 5.2).

El impacto de permitir que las personas puedan trabajar en sus casas en la exposición promedio diaria para el día 23 se observa en la Figura 5.2. Considerando la exposición promedio del día completo, los residentes de las comunas de Puente Alto, San Bernardo y La Pintana serían los más beneficiados con la medida (ver Tabla 5.3) y los residentes de las comunas de Santiago, Ñuñoa y Quinta Normal serían los más perjudicados (ver Tabla 5.4).

En ambos casos existen usuarios beneficiados y perjudicados para el día en particular analizado. Cabe mencionar que la evaluación de trabajar desde el hogar implica otros aspectos fundamentales como una menor congestión en las calles, menor cantidad de emisiones provenientes de vehículos y las externalidades positivas de las economías de aglomeración, los cuales no fueron considerados en este ejercicio.

MP2.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{-día equivalente}$]

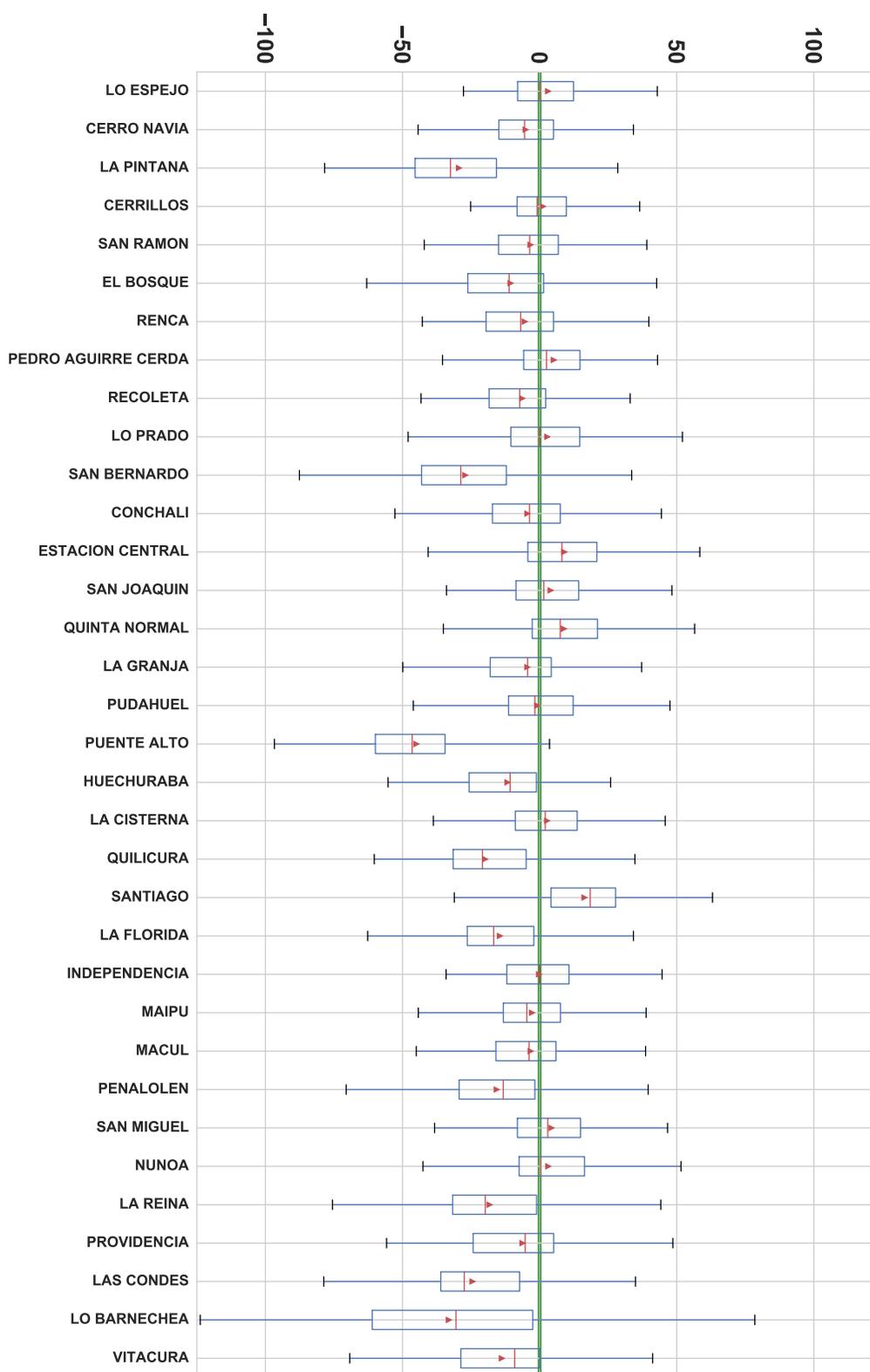


Figura 5.1: Distribución de la diferencia de exposición promedio a $\text{MP}_{2.5}$ entre trabajar desde el hogar y desde el puesto de trabajo durante la jornada agrupado por comuna de residencia con datos de CHIMERE (23 de julio de 2015). Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja representan el promedio y la mediana respectivamente

Tabla 5.1: Residentes beneficiados por trabajar desde el hogar (23 de julio de 2015)

Comuna	Δ Exposición promedio a $MP_{2,5}$ [$\mu g/m^3$]
Puente Alto	-44,8
Lo Barnechea	-33
La Pintana	-29,3
San Bernardo	-27
Las Condes	-24,4
Quilicura	-19,7
La Reina	-18,1
Peñalolén	-15,5
La Florida	-14,4
Vitacura	-13,7
Huechuraba	-11,6
El Bosque	-10,5
Recoleta	-6,2
Providencia	-6,1
Renca	-5,3
Cerro Navia	-5
La Granja	-4,4
Conchalí	-4,4
San Ramón	-3,2
Macul	-3,2
Maipú	-2,6
Pudahuel	-0,7
Independencia	-0,1

Tabla 5.2: Residentes perjudicados por trabajar desde el hogar (23 de julio de 2015)

Comuna	Δ Exposición promedio a $MP_{2,5}$ [$\mu g/m^3$]
Santiago	16,5
Estación Central	9,1
Quinta Normal	9
Pedro Aguirre Cerda	5,3
San Miguel	4,4
San Joaquín	4,1
Ñuñoa	3,3
Lo Espejo	3,2
Lo Prado	2,9
La Cisterna	2,8
Cerrillos	1,3

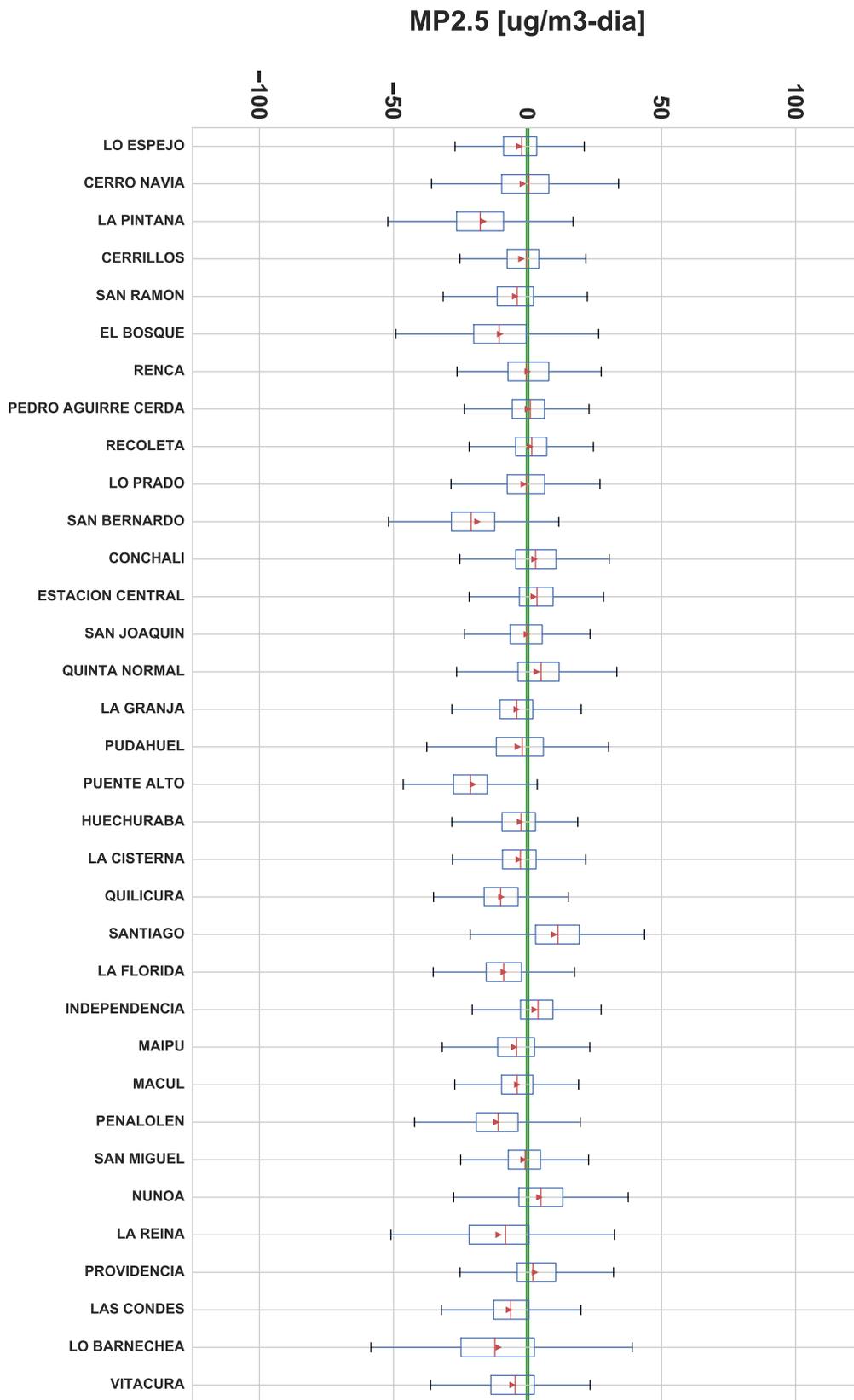


Figura 5.2: Distribución de la diferencia de exposición promedio a MP_{2,5} entre permanecer en el hogar y mantener el patrón de actividades agrupado por comuna de residencia con datos de CHIMERE (23 de julio de 2015). Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja representan el promedio y la mediana respectivamente

Tabla 5.3: Residentes beneficiados por permanecer en el hogar (23 de julio de 2015)

Comuna	Δ Exposición promedio a $MP_{2,5}$ [$\mu g/m^3$]
Puente Alto	-20,2
San Bernardo	-18,7
La Pintana	-16,4
Peñalolén	-11,6
Lo Barnechea	-10,8
La Reina	-10,7
El Bosque	-10,2
Quilicura	-9,7
La Florida	-8,9
Las Condes	-6,9
Vitacura	-5,6
Maipú	-4,9
San Ramón	-4,5
La Granja	-4
Macul	-3,8
Pudahuel	-3,6
La Cisterna	-3,2
Lo Espejo	-3
Huechuraba	-2,8
Cerrillos	-2,2
Cerro Navia	-1,7
San Miguel	-1,5
Lo Prado	-1,3
San Joaquín	-0,3

Tabla 5.4: Residentes perjudicados por permanecer en el hogar (23 de julio de 2015)

Comuna	Δ Exposición promedio a $MP_{2,5}$ [$\mu g/m^3$]
Santiago	10
Ñuñoa	4,4
Quinta Normal	3,5
Providencia	2,8
Independencia	2,7
Conchalí	2,6
Estación Central	2,3
Recoleta	1
Pedro Aguirre Cerda	0,2
Renca	0,1

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones finales

En la presente investigación se ha calculado la exposición a $MP_{2,5}$ de 105.588 usuarios frecuentes de transporte público en Santiago, lo que equivale al 1,7% de la población de la ciudad. Para ello, fueron utilizadas concentraciones atmosféricas de $MP_{2,5}$ y datos de movilidad de la población en el sistema de transporte público para una semana invernal desde el lunes 20 al viernes 24 de julio de 2015. La metodología planteada pretende ser abordada de manera general al tener la capacidad de estimar la exposición en otras ciudades, cortes temporales y contaminantes si existen datos similares.

La estimación del patrón de actividades de los usuarios frecuentes de transporte público en términos de posición y tiempo fue realizada con los datos pasivos generados por las transacciones de las tarjetas inteligentes *bip!* y los dispositivos GPS equipados en los buses del sistema de transporte público. Las actividades consideradas en esta tesis fueron hogar, trabajo, estudio, viaje y otros.

La estimación de la exposición a contaminantes atmosféricos fue derivada considerando el patrón de actividades de la población y dos bases de datos de concentraciones de $MP_{2,5}$. La primera base de datos proviene de la red de monitoreo de calidad de aire de Santiago con mediciones en intervalos horarios en 11 estaciones por la ciudad. La segunda base de datos involucra datos modelados de la dispersión de $MP_{2,5}$ por el modelo de transporte químico CHIMERE adaptado para reproducir las concentraciones de $MP_{2,5}$ en la atmósfera de Santiago en una grilla con una resolución espacial de 2×2 [km] a intervalos de una hora.

La metodología fue formulada en base a la posición de los paraderos de transporte público que visitaban los usuarios de la muestra y a la base de datos de material particulado fino. Los paraderos fueron asociados espacialmente a los valores de concentración más cercano a la grilla de CHIMERE o a la estación de monitoreo más cercana y temporalmente a la hora cerrada más próxima. La duración de la exposición en el trabajo, estudio, hogar y otras actividades se consideró como la diferencia entre el tiempo de bajada del usuario y la siguiente validación en el sistema y la duración de la exposición en viajes fue considerada

como el tiempo de viaje entre los paraderos de la ruta. La exposición fue calculada integrando el valor de concentración asignado al paradero correspondiente al usuario con el tiempo de duración de la actividad y se asumió que las concentraciones en exteriores eran iguales a las en interiores (como el hogar, trabajo o bus). Los resultados y conclusiones de este estudio son válidos solo para usuarios frecuentes de transporte público en el período analizado sin considerar la población más vulnerable a los efectos dañinos del material particulado como lactantes o tercera edad. Para obtener conclusiones más generales, se recomienda extender el estudio a períodos más largos y a un mayor universo de individuos.

En primer lugar, se concluye que los niveles de exposición se relacionan con la base de datos de contaminación y la movilidad de las personas para desarrollar sus actividades cotidianas. En particular, se encontraron diferencias entre los períodos de mayor exposición, la exposición durante actividades, la variabilidad espacial de la exposición y la correlación entre exposición e ingreso monetario.

Con las observaciones en estaciones de monitoreo se encontraron peaks de mayor exposición a $MP_{2,5}$ durante la madrugada a las 8:00 a.m. y en la noche a las 11:00 p.m. La exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ durante los días 20, 21, 22, 23 y 24 de julio de 2015 resultó ser de 44, 75, 73, 73 y 67 [$\mu g/m^3$], respectivamente, siendo el día 20 el de mayor variabilidad de exposición. Los residentes de la comuna de Cerro Navia, Pudahuel y Quilicura presentaron los más altos niveles de exposición con exposiciones desde los 53 a 102 [$\mu g/m^3$] y los niveles más bajos de exposición se encontraron para los residentes de la comuna de Lo Barnechea, Vitacura y Las Condes con mínimos entre 27 y 61 [$\mu g/m^3$]. El porcentaje de usuarios expuestos a niveles de alerta rondaron el 19 % y 30 % del total entre los días 21 y 24, respectivamente. Además, el 2 % de los usuarios estuvieron expuestos a niveles de Preemergencia el día 21.

Con CHIMERE, los peaks de mayor exposición se encontraron a las 11:00 a.m., a las 2:00 p.m. y a las 1:00 a.m. La exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ fue de 45, 72, 69, 89 y 82 [$\mu g/m^3$] para la semana laboral en estudio siendo el día 24 el de mayor variabilidad en términos de exposición. La máxima exposición promedio por día se detectó en las comunas de Las Condes, Ñuñoa, Pudahuel y Cerro Navia con exposiciones desde los 50 a los 92 [$\mu g/m^3$]. Los residentes de la comuna de Lo Barnechea nuevamente experimentaron los menores niveles de exposición promedio de $MP_{2,5}$ con mínimos entre los 37 y 63 [$\mu g/m^3$]. El porcentaje de usuarios expuestos a niveles de alerta estuvieron entre el 24 % y 73 % del total entre los días 21 y 24 además de un 5 % y 1 % de usuarios en niveles de Preemergencia los días 23 y 24 respectivamente.

El sesgo del modelo CHIMERE para reproducir las concentraciones de $MP_{2,5}$ en la ubicación de las estaciones fue estimado mediante la aplicación de la metodología utilizando los valores de las concentraciones de CHIMERE solamente en la posición de la red de monitoreo. En este caso, la exposición promedio fue de 43, 69, 66, 86 y 81 [$\mu g/m^3$]. La diferencia entre estos valores y los resultados de las estaciones es el error del modelo, ya que los resultados deberían ser iguales. En cambio, la diferencia entre los valores mencionados y los resultados con CHIMERE representan el impacto de la distribución espacial de la red de monitoreo actual en el cálculo de la exposición de usuarios frecuentes de transporte público. Si bien es posible calcular la exposición solo con las observaciones de la red, esta información es insuficiente para estimar una variabilidad espacial realista de la exposición a $MP_{2,5}$.

En cuanto a la exposición por actividad, se encontraron diferencias dependiendo del tipo de actividad, la comuna de residencia y el tipo de usuario que se realiza la actividad. La distribución de la exposición durante la actividad hogar resultó ser dependiente de la ubicación de la comuna en la ciudad, donde los habitantes de las comunas de residencia del sector sur en La Pintana, San Bernardo y Puente Alto resultaron ser los menos afectados junto con los residentes de Lo Barnechea. En cambio, los más afectados se observaron en el sector centro en las comunas de Santiago, Ñuñoa, Providencia y Quinta Normal.

Con CHIMERE, la distribución de la exposición durante las actividades trabajo y estudio resultaron semejantes producto de que el 70 % de los usuarios cumplen jornadas laborales y estudiantiles en las comunas de Santiago, Providencia y Las Condes. Sin embargo, al estimar la exposición en las comunas de trabajo y estudio, los trabajadores de Santiago, Quinta Normal y Estación Central presentaron los niveles más altos durante la jornada laboral y los de Lo Barnechea, Puente Alto y La Pintana los menores. Los estudiantes de Santiago, Quinta Normal y Lo Espejo se identificaron como los más expuestos durante la jornada escolar y los estudiantes de Lo Barnechea, Puente Alto y Quilicura como los menos expuestos. La exposición durante el viaje resultó ser de baja variabilidad producto de la regularidad de los patrones de viaje de los usuarios frecuentes. La exposición en otros fue la actividad con mayor variabilidad ya que la actividad tiene la libertad de desarrollarse en cualquier lugar e instante del día.

El 91 % de la exposición promedio en trabajadores y estudiantes resultó ser representada por la actividad hogar y trabajo o estudio para ambas bases de datos de contaminación. A partir de estos resultados, se concluye que existe una relación directa entre el tiempo asignado a la actividad, la accesibilidad de la comuna de residencia a actividades laborales y la representatividad de la actividad en la exposición total. Los viajes de los residentes de comunas periféricas resultaron tener una mayor proporción del total de exposición que los residentes de comunas céntricas. Lo mismo ocurrió para la contribución de las actividades basadas en el hogar, donde los residentes de comunas periféricas tuvieron una menor representatividad de la actividad hogar que los residentes de las comunas ubicadas en el centro.

Al comparar estudiantes y trabajadores, la actividad hogar resultó tener una mayor representación en el total de la exposición en estudiantes que en trabajadores dado que los estudiantes pasan más tiempo en el hogar. También se encontraron diferencias entre la representación de la actividad trabajo y estudio en el total de la exposición, donde la actividad trabajo contribuyó una mayor proporción del total que la actividad estudio en ambas bases de datos. En particular, el 91 % de la exposición total con datos de estaciones de monitoreo se dividió en un 38 % para la actividad trabajo y 53 % en actividad hogar para trabajadores y 34 % en estudio y 57 % en hogar para estudiantes. En cambio, la exposición con CHIMERE entrega un 48 % en trabajo y 43 % hogar para trabajadores y 38 % en estudio y 53 % en hogar para estudiantes. La diferencia entre CHIMERE y estaciones de monitoreo es de un 10 % para trabajadores y de 4 % para estudiantes, por lo que las concentraciones de CHIMERE son mayores en los lugares de trabajo/estudio y menores en los hogares que lo observado en las estaciones de monitoreo más cercanas.

Los resultados de la red de monitoreo de calidad del aire por comuna de residencia muestran una alta variabilidad de la exposición entre residentes de distintas comunas tal que en

los hogares del sector oriente de la ciudad (donde se localizan los hogares de mayor ingreso), se experimentan menores niveles de $MP_{2,5}$ que en el sector poniente (donde se ubican las comunas de menores ingresos). Sin embargo, los resultados con datos de CHIMERE muestran una baja variabilidad intercomunal de la exposición en que la relación entre los niveles de $MP_{2,5}$ observados en estos sectores y el ingreso de la comuna no es directo. Para determinar esta correlación se realizaron regresiones lineales simples entre exposición, ingreso monetario y el índice de desarrollo socioeconómico (IDSE) para ambas bases de datos de material particulado fino. Las regresiones corroboraron que el ingreso es una variable significativa y que existe una relación indirecta entre exposición e ingreso monetario cuando solo se considera la información de la red de monitoreo ($\beta = -8,64 \times 10^{-6}$; $\varepsilon = 1,48 \times 10^{-6}$; $Test - T = -5,82$; $R^2 = 0,51$) y que para el caso de CHIMERE la variable ingreso no es significativa por lo que no existiría una relación clara entre ambas variables ($\beta = -1,44 \times 10^{-6}$; $\varepsilon = 1,21 \times 10^{-6}$; $Test - T = -1,18$; $R^2 = 0,04$). Al evaluar la significancia de la variable IDSE, la cual incorpora aspectos de la comuna como el ingreso, la pobreza, educación, vivienda y saneamiento, se encontraron resultados similares a los de la variable ingreso para el caso con estaciones de monitoreo ($\beta = -58,5$; $\varepsilon = 13,18$; $Test - T = -4,44$; $R^2 = 0,38$) y para el caso de CHIMERE ($\beta = 8,26$; $\varepsilon = 9,63$; $Test - T = 0,857$; $R^2 = 0,02$). Dadas las diferencias planteadas, es probable que la correlación sea producto de la distribución actual de la red de monitoreo y no de las condiciones reales a las que están expuestos los usuarios frecuentes de transporte público, al punto de que existiría una democratización de la exposición al incorporar una mayor variabilidad espacial de las concentraciones.

Las estaciones de monitoreo buscan vigilar grandes áreas urbanas, por lo que los resultados con estos datos representan la exposición de forma agregada. Esto provoca una baja variabilidad de la exposición en usuarios que residen en la misma comuna que no es realista para comunas de gran superficie, ya que hogares que se encuentran a gran distancia tendrían los mismos niveles de exposición. Lo anterior no ocurre con la exposición calculada con CHIMERE donde se encontró una alta variabilidad intracomunal para todas las comunas de residencia. Por ello, se concluye que con el trabajo exploratorio de incorporar la movilidad de la población y datos de contaminación más desagregados es más probable obtener resultados más cercanos a la exposición real a $MP_{2,5}$ que la exposición calculada con las concentraciones observadas en la red de monitoreo.

Hoy en día la norma de calidad de aire se basa en las mediciones en estaciones de monitoreo y no en la exposición de la población. La exposición calculada con estas observaciones es válida solo para aquellos que realizan actividades cerca de la red. En la realidad, la población no necesariamente se comporta de esta manera y es esto lo que se busca representar con el método propuesto. Los resultados permiten determinar la cantidad de usuarios expuestos a los niveles de calidad del aire considerando la movilidad y la dispersión de contaminantes de forma simplificada, contribuyendo con información valiosa sobre la exposición a $MP_{2,5}$ en Santiago que en el estado del arte actual no se encuentra disponible.

El modelo propuesto también posee el potencial de evaluar políticas públicas medioambientales. La estimación de la exposición a contaminantes atmosféricos de las personas sujeto a variables como las fuentes de emisiones de los contaminantes genera la oportunidad de analizar la sensibilidad de la exposición frente a cambios en las emisiones de los sectores de transporte, vivienda, industria y energía. En particular, al aplicar cambios en los patrones

de movilidad de los usuarios para simular la actividad trabajo de forma remota, los habitantes de las comunas periféricas como Puente Alto, San Bernardo, La Pintana, Peñalolén y Lo Barnechea resultaron ser los más beneficiados. Los habitantes de Santiago, Ñuñoa y Quinta Normal fueron los más perjudicados y los habitantes de Renca, Pedro Aguirre Cerda y San Joaquín fueron indiferentes con la medida. Basándose en lo anterior, es posible evaluar medidas medioambientales para proteger a la población en episodios críticos de contaminación con el modelo de estimación de exposición propuesto.

Finalmente, la capacidad del modelo de estimar la exposición constituye la etapa previa a la estimación del impacto de la contaminación atmosférica en la salud de la población. Esto no es posible si se trabaja solamente con las concentraciones de los contaminantes debido a que primero es necesario integrar tanto la variable temporal como la espacial de las personas expuestas para obtener esta información.

6.2. Recomendaciones, consideraciones y trabajo a futuro

A partir de los resultados obtenidos, se genera la propuesta de densificar la red de monitoreo de calidad de aire mediante la implementación de nuevas estaciones de monitoreo de calidad de aire con el fin de mejorar la representatividad de las condiciones ambientales en las comunas de la ciudad de Santiago. En particular, los ciudadanos de las comunas de La Reina, Vitacura, Peñalolén, Maipú y Huechuraba desarrollan sus actividades a una distancia promedio sobre 4 [km] de la estación de monitoreo más cercana. Dado que el 17% de los habitantes de Santiago se concentran en dichas zonas de residencia, se recomienda estudiar la instalación de las próximas estaciones de monitoreo en alguna de las comunas mencionadas.

Los resultados obtenidos en la presente investigación dependen de la riqueza de los datos utilizados. Para mejorar las estimaciones de la exposición a contaminantes atmosféricos, es necesario mejorar las estimaciones de las concentraciones de contaminantes y un seguimiento más detallado del patrón de actividades de población en la ciudad.

Una de las consideraciones de este trabajo respecto a la metodología es el supuesto de que las concentraciones en exteriores son iguales a las concentraciones en interiores. Si bien esto no es así, los datos de contaminación atmosférica provenientes tanto de la red de monitoreo como del modelo CHIMERE representan valores exteriores. En este trabajo, no se consideraron concentraciones en interiores de estructuras ni modos de transporte, por lo que se sugiere incorporar estimaciones de concentraciones en interiores para obtener una mejor estimación de la exposición.

Otra fuente de sesgo en la estimación del modelo CHIMERE es el error asociado al cálculo de las concentraciones en la posición de las estaciones de monitoreo. En este trabajo, la exposición promedio calculada a partir de las concentraciones simuladas por CHIMERE en la posición de las estaciones resultó ser distinta a la exposición promedio calculada utilizando datos de la red. Por lo tanto, la exposición puede ser mejorada calibrando lo estimado por el modelo con lo observado en las estaciones.

También existe el sesgo respecto a la condición de homogeneidad dentro de las celdas que conforman la grilla de concentraciones de CHIMERE. Para ello, se sugiere implementar factores que permitan capturar la variabilidad de las concentraciones a escala de sub-grilla (Valari and Menut, 2010). Estos factores permiten una mejor estimación de todas las actividades consideradas en este estudio al desagregar el flujo de las emisiones por el tipo de uso de suelo, condiciones geográficas y ventilación en cada celda. Los ambientes urbanos en que se desarrollan las actividades y los viajes en particular serían los más beneficiados con esta aplicación, dado que la resolución espacial del modelo propuesto actualmente considera condiciones homogéneas en un área de 20 cuadras por 20 cuadras aproximadamente. Por lo tanto, no identifica la variabilidad de las concentraciones producto de la presencia de zonas residenciales, parques o tráfico en ejes altamente congestionados que pueden aumentar considerablemente los niveles de exposición durante dicha actividad.

Una línea de investigación futura para mejorar los datos relacionados con los patrones de movilidad de los habitantes de Santiago es modelar las trayectorias individuales con datos más desagregados. Para desarrollar esta línea, se recomienda utilizar información proveniente de telefonía celular dado que este tipo de datos generan una base de datos de gran tamaño, donde la posición del usuario no está acotado a las líneas del sistema de transporte público de la ciudad sino que a la triangulación de la posición del usuario con el uso de las antenas de telefonía móvil.

Otra línea de investigación interesante es vincular los resultados obtenidos con impactos en la salud humana. En este ámbito, se propone estudiar la relación entre la exposición a $MP_{2,5}$ y variables como mortalidad y admisiones hospitalarias por enfermedades respiratorias y cardiovasculares a nivel comunal durante el mismo período de análisis mediante métodos estadísticos. A su vez, se sugiere el cálculo de la dosis de $MP_{2,5}$ ingerida por la población mediante la incorporación de información sobre la frecuencia respiratoria en función de la actividad correspondiente y determinar los potenciales riesgos en la salud. Además, la metodología propuesta en este trabajo es extendible a otros horizontes temporales, tipos de usuarios incorporando tarjetas inteligentes de tercera edad y contaminantes. En base a lo anterior, surgen líneas de investigación para otros escenarios como por ejemplo el estudio de la exposición a ozono en verano.

Bibliografía

- Agard, B., Morency, C., Trépanier, M., 2006. Mining public transport user behaviour from smart card data. *IFAC Proceedings Volumes* 39, 399–404.
- Alexander, L., Jiang, S., Murga, M., González, M. C., 2015. Origin–Destination trips by purpose and time of day inferred from mobile phone data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 58, 240–250.
- Amaya, M., Cruzat, R., Munizaga, M. A., 2018. Estimating the residence zone of frequent public transport users to make travel pattern and time use analysis. *Journal of Transport Geography* (en prensa).
- Azmi, S. Z., Latif, M. T., Ismail, A. S., Juneng, L., Jemain, A. A., 2010. Trend and status of air quality at three different monitoring stations in the Klang Valley, Malaysia. *Air Quality, Atmosphere & Health* 3, 53–64.
- Barraza, F., Lambert, F., Jorquera, H., Villalobos, A. M., Gallardo, L., 2017. Temporal evolution of main ambient PM_{2.5} sources in Santiago, Chile, from 1998 to 2012. *Atmospheric Chemistry and Physics* 17, 10093.
- Brasseur, G., Hauglustaine, D., Walters, S., Rasch, P., Müller, J.-F., Granier, C., Tie, X., 1998. MOZART, a global chemical transport model for ozone and related chemical tracers: 1. model description. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 103, 28265–28289.
- Byun, D., Schere, K. L., 2006. Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the models-3 community multiscale air quality (cmaq) modeling system. *Applied Mechanics Reviews* 59, 51–77.
- Cavellin, L. D., Weichenthal, S., Tack, R., Ragettli, M. S., Smargiassi, A., Hatzopoulou, M., 2015. Investigating the use of portable air pollution sensors to capture the spatial variability of traffic-related air pollution. *Environmental Science & Technology* 50, 313–320.
- Cortese, A. D., Spengler, J. D., 1976. Ability of fixed monitoring stations to represent personal carbon monoxide exposure. *Journal of the Air Pollution Control Association* 26, 1144–1150.
- Devillaine, F., Munizaga, M., Trépanier, M., 2012. Detection of activities of public transport users by analyzing smart card data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2276, 48–55.

- Dewulf, B., Neutens, T., Lefebvre, W., Seynaeve, G., Vanpoucke, C., Beckx, C., Van de Weghe, N., 2016. Dynamic assessment of exposure to air pollution using mobile phone data. *International Journal of Health Geographics* 15, 14.
- Draxler, R. R., Hess, G., 1998. An overview of the HYSPLIT4 modelling system for trajectories. *Australian Meteorological Magazine* 47, 295–308.
- Escudero, M., Querol, X., Pey, J., Alastuey, A., Pérez, N., Ferreira, F., Alonso, S., Rodríguez, S., Cuevas, E., 2007. A methodology for the quantification of the net african dust load in air quality monitoring networks. *Atmospheric Environment* 41, 5516–5524.
- Etyemezian, V., Tesfaye, M., Yimer, A., Chow, J., Mesfin, D., Nega, T., Nikolich, G., Watson, J., Wondmagegn, M., 2005. Results from a pilot-scale air quality study in Addis Ababa, Ethiopia. *Atmospheric Environment* 39, 7849–7860.
- Gattini, C., Chavez, C., Albers, D., 2014. Comunas de Chile, según nivel socio-económico, de salud y desarrollo humano. Revisión 2013. OCHISAP 2014.
- Gschwender, A., Munizaga, M., Simonetti, C., 2016. Using smart card and GPS data for policy and planning: The case of Transantiago. *Research in Transportation Economics* 59, 242–249.
- Harpaz, I., 2002. Advantages and disadvantages of telecommuting for the individual, organization and society. *Work Study* 51, 74–80.
- Hasan, S., Zhan, X., Ukkusuri, S. V., 2013. Understanding urban human activity and mobility patterns using large-scale location-based data from online social media. In: *Proceedings of the 2nd ACM SIGKDD International Workshop on Urban Computing*. ACM, p. 6.
- INE, 2017. Informe CENSO 2017. Instituto Nacional de Estadísticas de Chile.
- INE, 2018. Boletín Empleo Trimestral, Región Metropolitana. Instituto Nacional de Estadísticas de Chile.
- Karanasiou, A., Viana, M., Querol, X., Moreno, T., de Leeuw, F., 2014. Assessment of personal exposure to particulate air pollution during commuting in european cities. recommendations and policy implications. *Science of the Total Environment* 490, 785–797.
- Kim, K.-H., Kabir, E., Kabir, S., 2015. A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International* 74, 136–143.
- Klepeis, N. E., Nelson, W. C., Ott, W. R., Robinson, J. P., Tsang, A. M., Switzer, P., Behar, J. V., Hern, S. C., Engelmann, W. H., 2001. The national human activity pattern survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* 11, 231.
- Leech, J., Wilby, K., McMullen, E., Laporte, K., 1996. The canadian human activity pattern survey: Report of methods and population surveyed. *Chronic Diseases in Canada* 17, 118–123.

- Lefebvre, W., Degrawe, B., Beckx, C., Vanhulsel, M., Kochan, B., Bellemans, T., Janssens, D., Wets, G., Janssen, S., De Vlieger, I., et al., 2013. Presentation and evaluation of an integrated model chain to respond to traffic-and health-related policy questions. *Environmental Modelling & Software* 40, 160–170.
- Liu, H.-Y., Skjetne, E., Kobernus, M., 2013. Mobile phone tracking: in support of modelling traffic-related air pollution contribution to individual exposure and its implications for public health impact assessment. *Environmental Health* 12, 93.
- Ma, X., Wu, Y.-J., Wang, Y., Chen, F., Liu, J., 2013. Mining smart card data for transit riders' travel patterns. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 36, 1–12.
- Marć, M., Tobiszewski, M., Zabiegała, B., de la Guardia, M., Namieśnik, J., 2015. Current air quality analytics and monitoring: A review. *Analytica Chimica Acta* 853, 116–126.
- Mavroidis, I., Ilia, M., 2012. Trends of NO_x, NO₂ and O₃ concentrations at three different types of air quality monitoring stations in Athens, Greece. *Atmospheric Environment* 63, 135–147.
- Mazzeo, A., Huneus, N., Ordoñez, C., Orfanos-Cheuquelaf, A., Menut, L., Mailler, S., Valari, M., Denier van der Gon, H., Gallardo, L., Muñoz, R., Galleguillos, M., Osses, M., Tolvett, S., 2018. Impact of residential combustion and transport emissions on air pollution in Santiago during winter. En preparación.
- MDS, 2015. Encuesta de caracterización socioeconómica nacional. Ministerio de Desarrollo Social de Chile.
- Menut, L., Bessagnet, B., Khvorostyanov, D., Beekmann, M., Blond, N., Colette, A., Coll, I., Curci, G., Foret, G., Hodzic, A., et al., 2014. CHIMERE 2013: A model for regional atmospheric composition modelling. *Geoscientific Model Development* 6, 981–1028.
- Mickwitz, P., 2003. A framework for evaluating environmental policy instruments: context and key concepts. *Evaluation* 9, 415–436.
- MINEDUC, 2018. Estadísticas de la educación 2016. Ministerio de Educación.
- MMA, 2011. Establece norma primaria de calidad ambiental para material particulado fino respirable MP_{2,5}. *Diario Oficial de la República de Chile* 39.955, 24–27.
- MMA, 2013. Reporte del Estado del Medio Ambiente. Ministerio de Medio Ambiente.
- Monn, C., 2001. Exposure assessment of air pollutants: A review on spatial heterogeneity and indoor/outdoor/personal exposure to suspended particulate matter, nitrogen dioxide and ozone. *Atmospheric Environment* 35, 1–32.
- Munizaga, M. A., Palma, C., 2012. Estimation of a disaggregate multimodal public transport origin–destination matrix from passive smartcard data from Santiago, Chile. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 24, 9–18.

- Muñoz, R. C., Alcañaz, R. I., 2012. Variability of urban aerosols over Santiago, Chile: Comparison of surface PM₁₀ concentrations and remote sensing with ceilometer and lidar. *Aerosol and Air Quality Research* 12, 8–19.
- Muñoz, V., Thomas, A., Navarrete, C., Contreras, R., 2016. Encuesta Origen-Destino de Santiago 2012: Resultados y validaciones. *Ingeniería de Transporte* 19.
- Nyhan, M., Grauwlin, S., Britter, R., Misstear, B., McNabola, A., Laden, F., Barrett, S. R., Ratti, C., 2016. Exposure track the impact of mobile device based mobility patterns on quantifying population exposure to air pollution. *Environmental Science & Technology* 50, 9671–9681.
- Olguín, J., Jara-Díaz, S., Munizaga, M., 2009. Análisis de patrones de actividades a partir de la EOD 2001. *Ingeniería de Transporte* 13.
- Ott, W. R., 1982. Concepts of human exposure to air pollution. *Environment International* 7, 179–196.
- Palmes, E., Gunnison, A., DiMattio, J., Tomczyk, C., 1976. Personal sampler for nitrogen dioxide. *American Industrial Hygiene Association Journal* 37, 570–577.
- Pelletier, M.-P., Trépanier, M., Morency, C., 2011. Smart card data use in public transit: A literature review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 19, 557–568.
- Phithakitnukoon, S., Horanont, T., Di Lorenzo, G., Shibasaki, R., Ratti, C., 2010. Activity-aware map: Identifying human daily activity pattern using mobile phone data. In: *International Workshop on Human Behavior Understanding*. Springer, pp. 14–25.
- Rivas, I., Kumar, P., Hagen-Zanker, A., 2017. Exposure to air pollutants during commuting in London: are there inequalities among different socio-economic groups? *Environment International* 101, 143–157.
- Rutllant, J., Garreaud, R., 1995. Meteorological air pollution potential for Santiago, Chile: towards an objective episode forecasting. *Environmental Monitoring and Assessment* 34, 223–244.
- Rutllant, J., Garreaud, R., 2004. Episodes of strong flow down the western slope of the subtropical Andes. *Monthly Weather Review* 132 (2), 611–622.
- Salvatierra, M., 2016. Exposición de ciclistas a material particulado y carbono negro en Santiago. Memoria Título Ingeniero Civil Mecánico, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Barker, D., Dudhia, M., Huang, X., Wang, W., Powers, Y., 2008. A description of the advanced research WRF Ver. 30. NCAR Technical Note. NCAR/TN-475.
- Suárez, L., Mesías, S., Iglesias, V., Silva, C., Cáceres, D. D., Ruiz-Rudolph, P., 2014. Personal exposure to particulate matter in commuters using different transport modes (bus, bicycle,

- car and subway) in an assigned route in downtown Santiago, Chile. *Environmental Science: Processes & Impacts* 16, 1309–1317.
- USACH, 2014. Actualización y sistematización del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la Región Metropolitana. Universidad de Santiago de Chile.
- Valari, M., Menut, L., 2010. Transferring the heterogeneity of surface emissions to variability in pollutant concentrations over urban areas through a chemistry-transport model. *Atmospheric Environment* 44, 3229–3238.
- Valari, M., Menut, L., Chatignoux, E., 2011. Using a chemistry transport model to account for the spatial variability of exposure concentrations in epidemiologic air pollution studies. *Journal of the Air & Waste Management Association* 61, 164–179.
- Violante, F. S., Barbieri, A., Curti, S., Sanguinetti, G., Graziosi, F., Mattioli, S., 2006. Urban atmospheric pollution: Personal exposure versus fixed monitoring station measurements. *Chemosphere* 64, 1722–1729.
- WB, 2010. World Development Indicators. World Bank, New York.
- WHO, 2006. Air quality guidelines: global update 2005. World Health Organization.
- WHO, 2016. World health statistics 2016: Monitoring health for the SDGs sustainable development goals. World Health Organization.
- Yu, H., Russell, A., Mulholland, J., Huang, Z., 2018. Using cell phone location to assess misclassification errors in air pollution exposure estimation. *Environmental Pollution* 233, 261–266.

Apéndice A

Anexos

Tabla A.1: Distribución de habitantes de Santiago en 34 comunas.

Fuente: (INE, 2017)

Comuna	Habitantes	Porcentaje
Puente Alto	568.106	9 %
Maipú	521.627	9 %
Santiago	404.495	7 %
La Florida	366.916	6 %
San Bernardo	301.313	5 %
Las Condes	294.838	5 %
Peñalolén	241.599	4 %
Pudahuel	230.293	4 %
Quilicura	210.410	3 %
Ñuñoa	208.237	3 %
La Pintana	177.335	3 %
El Bosque	162.505	3 %
Recoleta	157.851	3 %
Renca	147.151	2 %
Estación Central	147.041	2 %
Providencia	142.079	2 %
Cerro Navia	132.622	2 %
Conchalí	126.955	2 %
La Granja	116.571	2 %
Macul	116.534	2 %
Quinta Normal	110.026	2 %
San Miguel	107.954	2 %
Lo Barnechea	105.833	2 %
Pedro Aguirre Cerda	101.174	2 %
Independencia	100.281	2 %
Lo Espejo	98.804	2 %
Huechuraba	98.671	2 %
Lo Prado	96.249	2 %
San Joaquín	94.492	2 %
La Reina	92.787	2 %
La Cisterna	90.119	1 %
Vitacura	85.384	1 %
San Ramón	82.900	1 %
Cerrillos	80.832	1 %
Total	6.119.984	100 %

Matriz Origen-Destino de usuarios por propósito

A continuación se presentan las matrices origen-destino desde la comuna de residencia (etiquetada según Tabla A.2) hacia la comuna de trabajo (ver Tabla A.3) y de estudio (ver Tabla A.4).

Tabla A.2: Diccionario comunas.

Comuna	Número
Lo Espejo	1
Cerro Navia	2
La Pintana	3
Cerrillos	4
San Ramón	5
El Bosque	6
Renca	7
Pedro Aguirre Cerda	8
Recoleta	9
Lo Prado	10
San Bernardo	11
Conchalí	12
Estación Central	13
San Joaquín	14
Quinta Normal	15
La Granja	16
Pudahuel	17
Puente Alto	18
Huechuraba	19
La Cisterna	20
Quilicura	21
Santiago	22
La Florida	23
Independencia	24
Maipú	25
Macul	26
Peñalolén	27
San Miguel	28
Ñuñoa	29
La Reina	30
Providencia	31
Las Condes	32
Lo Barnechea	33
Vitacura	34

Tabla A.3: Matriz Origen-Destino de usuarios que viajan desde comuna de residencia hacia comuna de trabajo.

O/D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	Total	
1	17	4	0	0	18	2	4	4	10	27	2	7	1	21	15	13	1	14	0	1	16	2	234	11	4	28	10	4	54	21	8	122	70	2	9	0.9%
2	4	35	0	5	1	0	10	2	34	13	2	8	43	12	104	0	37	5	1	5	7	405	14	16	20	7	6	22	40	9	172	30	1	22	1.3%	
3	5	1	10	3	3	7	0	2	18	6	17	2	22	31	7	10	4	20	3	17	8	215	27	3	4	22	13	30	24	11	102	58	0	5	0.8%	
4	0	6	1	63	1	2	6	8	28	12	1	0	61	11	12	0	9	2	0	5	2	295	8	5	104	6	9	19	24	9	164	82	1	7	1.1%	
5	2	1	2	3	16	3	2	5	51	14	0	4	36	36	10	1	11	15	2	18	12	406	55	6	4	28	15	36	71	40	284	155	0	5	1.6%	
6	3	1	8	3	3	7	2	2	28	5	13	5	26	22	9	3	1	6	5	27	5	219	24	5	2	9	11	45	27	6	136	47	3	4	0.8%	
7	2	8	0	3	0	2	53	3	32	8	1	5	16	10	29	1	46	2	8	4	36	91	10	30	24	5	1	4	6	1	13	5	0	2	0.5%	
8	17	1	5	24	1	3	6	18	31	4	3	8	16	6	12	1	7	5	1	7	5	295	13	5	27	18	3	26	23	9	139	91	3	10	1.0%	
9	3	8	2	12	13	5	12	6	174	25	6	27	125	44	27	2	32	11	38	29	45	790	49	41	35	28	7	78	75	14	318	106	5	38	2.6%	
10	1	16	1	15	5	2	9	4	101	78	5	9	150	57	57	3	76	19	11	15	11	1828	48	17	73	47	30	104	154	49	1087	618	12	47	5.5%	
11	5	1	2	2	5	11	0	2	40	8	34	3	11	21	9	1	5	6	3	23	7	201	43	10	4	22	18	36	25	16	158	89	1	11	1.0%	
12	1	1	1	2	3	0	17	3	86	15	5	45	25	14	10	1	14	2	36	7	66	240	8	72	12	5	2	16	25	1	70	31	1	6	1.0%	
13	4	12	2	29	7	3	9	10	111	50	7	16	191	75	29	1	44	16	18	19	20	1482	43	13	130	43	32	87	140	68	1370	848	11	56	5.7%	
14	3	1	9	11	12	5	3	1	26	5	5	3	32	39	11	6	10	40	2	10	7	390	50	6	13	28	7	15	36	13	236	105	3	8	1.3%	
15	5	10	0	9	4	1	12	3	42	20	8	6	35	35	57	1	38	9	6	12	10	480	30	9	27	14	7	29	56	18	310	146	3	22	1.7%	
16	3	2	9	4	10	3	0	4	35	3	3	2	33	32	9	12	7	26	1	12	1	294	57	9	4	16	23	33	62	37	233	137	2	9	1.3%	
17	5	20	0	27	1	3	28	2	83	52	10	10	130	61	113	3	156	19	9	16	18	1179	55	19	144	45	17	65	137	31	666	336	6	37	4.0%	
18	1	5	6	12	16	8	4	4	114	37	4	10	110	157	44	19	26	194	6	50	10	1812	330	28	9	213	133	105	389	176	1737	803	13	52	7.6%	
19	0	1	0	1	1	0	2	0	41	4	0	16	10	3	5	0	2	2	27	7	8	117	3	12	4	2	2	3	8	1	10	12	2	22	0.4%	
20	1	2	1	6	12	6	0	1	121	10	7	6	52	29	9	5	1	17	13	29	6	881	36	16	7	28	29	90	44	23	539	212	6	12	2.6%	
21	2	2	1	7	5	2	67	0	33	7	3	63	27	3	21	0	22	3	24	4	139	258	2	41	18	1	1	16	5	0	15	8	1	36	1.0%	
22	12	20	17	54	46	17	11	28	304	149	23	38	359	150	88	13	114	115	47	111	56	1675	238	68	199	163	87	253	356	175	3376	2386	32	124	12.5%	
23	3	6	7	18	16	5	8	7	141	33	5	19	99	170	48	25	49	132	9	51	14	2482	277	28	24	184	90	94	379	142	1881	726	15	43	8.3%	
24	2	0	0	2	3	0	20	2	23	4	3	20	9	6	3	1	9	1	20	7	22	232	9	28	8	4	17	23	6	92	74	0	9	0.8%		
25	15	14	0	127	4	5	13	27	176	60	28	25	448	141	84	0	114	22	13	25	22	2739	83	27	636	67	26	93	279	51	1639	687	12	31	8.9%	
26	1	4	0	5	8	2	2	3	48	15	6	5	34	31	18	2	21	63	2	13	5	736	77	10	18	61	34	19	131	56	592	288	4	26	2.7%	
27	0	0	3	4	13	2	2	2	36	18	4	3	52	26	10	4	11	35	2	19	5	697	61	11	13	79	94	25	236	156	734	384	11	47	3.2%	
28	2	3	2	13	9	6	7	6	149	32	1	10	66	23	11	5	20	16	9	46	13	1217	29	22	14	18	13	65	41	16	715	314	3	17	3.4%	
29	2	5	7	5	13	8	3	3	50	34	4	5	81	20	16	7	27	80	6	15	8	1272	119	13	45	70	35	35	136	35	737	415	6	24	3.8%	
30	0	2	4	1	3	1	1	1	11	8	2	1	26	10	5	1	11	29	0	4	0	459	29	4	10	15	20	8	61	38	389	133	7	18	1.5%	
31	11	16	12	8	26	13	1	8	62	68	18	4	132	49	28	9	39	102	5	20	2	1926	130	9	61	102	52	44	78	42	644	672	3	32	5.1%	
32	6	18	10	6	13	9	5	14	27	44	16	2	123	22	16	14	37	60	16	14	5	2340	73	3	55	45	24	42	77	27	1110	724	37	41	5.8%	
33	0	0	1	0	1	1	0	0	4	1	0	0	3	0	3	0	5	5	1	2	0	29	6	0	1	3	1	1	3	5	29	33	40	44	0.3%	
34	3	6	3	3	1	1	2	10	9	5	0	14	3	4	2	10	12	8	6	4	49	9	1	7	1	3	6	1	1	40	31	0	11	0.3%		
Total	0.2%	0.3%	0.1%	0.6%	0.3%	0.2%	0.4%	0.2%	2.6%	1.0%	0.3%	0.4%	3.0%	1.6%	1.1%	0.2%	1.2%	1.3%	0.4%	0.8%	0.7%	32.0%	2.4%	0.7%	2.1%	1.6%	1.0%	1.9%	3.7%	1.5%	22.8%	12.6%	0.3%	1.0%	100.0%	

Tabla A.4: Matriz Origen-Destino de usuarios que viajan desde comuna de residencia hacia comuna de estudio.

O/D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	Total
1	4	0	0	6	0	0	0	1	1	2	0	0	2	4	0	0	1	2	0	3	0	48	1	0	4	2	2	5	3	0	21	9	1	0	0.6%
2	0	11	0	1	0	0	2	0	4	2	0	1	3	0	9	0	12	0	2	0	0	64	1	1	5	1	0	3	4	1	21	3	0	2	0.8%
3	0	0	11	0	2	0	0	0	2	0	5	0	6	3	0	3	0	4	0	8	0	37	4	0	0	1	2	6	0	2	19	3	0	0	0.6%
4	0	0	0	13	0	0	1	3	1	0	1	0	11	1	0	0	0	0	0	0	0	71	2	0	15	1	0	5	2	1	24	9	0	0	0.9%
5	0	0	1	1	7	4	0	2	6	0	0	0	4	9	0	1	0	3	1	6	0	112	16	2	1	9	4	12	8	1	67	24	1	0	1.6%
6	0	0	1	1	1	8	0	1	5	1	9	0	3	5	0	0	0	1	0	7	0	52	4	2	1	0	1	4	6	0	30	8	0	0	0.8%
7	0	2	1	0	0	1	10	0	3	0	0	1	5	1	0	0	0	1	0	0	3	17	0	3	1	2	0	1	3	0	3	2	0	0	0.3%
8	1	0	0	4	0	0	1	5	0	1	1	3	5	0	0	0	1	0	2	3	0	58	3	0	2	1	0	4	4	0	29	11	0	1	0.8%
9	0	1	3	1	3	0	2	0	37	3	1	3	17	2	2	1	1	5	9	5	6	253	13	5	2	8	2	8	7	7	79	17	0	2	2.7%
10	0	2	0	1	2	0	2	0	21	40	2	1	35	13	12	0	14	6	1	3	3	416	11	5	23	16	5	14	32	4	208	115	0	3	5.7%
11	0	0	0	0	1	4	0	1	10	0	17	0	5	2	0	0	0	1	1	7	0	67	11	3	0	5	0	12	4	2	48	8	0	0	1.1%
12	0	0	0	1	0	0	3	0	5	2	0	17	9	2	3	0	1	1	5	1	8	58	1	16	4	2	0	3	2	0	12	4	0	2	0.9%
13	0	2	2	6	0	0	0	0	23	20	1	2	61	19	4	0	11	0	4	7	2	584	8	6	27	13	4	21	33	9	449	192	1	5	8.1%
14	0	0	5	1	2	0	0	3	5	2	0	0	7	8	1	0	1	3	1	2	1	97	14	1	2	10	0	8	14	3	58	18	0	2	1.4%
15	0	1	1	2	0	0	1	1	6	6	0	0	4	4	9	0	4	2	0	0	0	129	2	9	7	6	1	1	8	4	78	25	1	1	1.7%
16	0	0	5	2	4	0	0	2	6	2	2	1	6	8	2	8	1	6	0	5	0	86	28	3	3	6	5	4	10	2	65	23	0	0	1.6%
17	0	9	1	2	1	0	2	0	16	14	3	2	40	8	9	0	51	1	5	2	2	343	10	4	35	11	4	9	36	3	151	53	1	2	4.4%
18	0	0	14	3	1	0	0	0	18	8	1	0	27	41	3	2	4	74	1	8	1	445	101	13	8	37	16	21	67	28	415	136	2	7	8.0%
19	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3	1	1	22	0	2	1	0	0	5	1	0	4	2	0	4	0.3%
20	1	0	2	0	5	1	0	0	22	0	4	1	15	5	2	0	2	5	2	16	1	248	15	4	1	7	5	32	8	3	110	45	1	2	3.0%
21	0	0	1	0	0	0	4	0	2	0	0	7	2	1	0	0	1	0	2	1	24	32	1	6	0	0	0	5	1	1	1	2	0	0	0.5%
22	1	6	14	10	11	1	7	7	60	30	12	8	90	53	16	3	14	39	17	25	9	643	61	51	30	56	11	74	79	27	826	455	5	10	14.7%
23	0	2	8	2	7	1	4	2	14	5	1	0	26	50	5	3	6	32	1	7	1	503	115	15	4	55	24	24	72	19	401	117	1	5	8.2%
24	0	0	0	0	0	0	2	0	4	1	1	4	3	2	2	0	1	2	2	0	2	47	0	10	1	2	0	1	4	1	18	10	0	0	0.6%
25	4	2	2	26	0	1	4	1	42	16	2	0	70	26	11	1	19	5	0	2	1	686	13	22	233	21	8	18	47	9	341	100	1	6	9.3%
26	1	0	3	0	0	1	0	0	3	2	1	1	14	12	3	0	2	10	1	2	1	166	24	2	2	26	5	7	33	5	132	38	0	3	2.7%
27	0	0	3	0	1	1	0	1	2	1	1	0	9	4	2	0	0	11	0	2	0	124	20	1	0	20	24	5	40	20	146	48	0	6	2.6%
28	1	0	3	3	0	3	1	2	16	4	1	1	35	2	3	2	3	5	2	9	0	308	9	5	4	5	2	46	6	3	156	42	0	2	3.6%
29	0	2	4	2	2	0	1	1	7	6	1	3	14	4	3	1	4	8	0	1	2	249	34	10	7	25	11	9	43	5	186	82	2	3	3.9%
30	0	0	5	1	1	0	0	0	6	1	1	0	3	2	0	0	0	1	0	4	0	73	4	3	1	4	5	1	17	10	61	15	1	1	1.2%
31	0	1	3	0	5	1	1	2	13	11	1	3	26	16	5	0	6	16	0	3	0	232	33	6	8	43	2	19	19	11	177	88	0	4	4.0%
32	1	2	2	1	3	1	0	1	7	9	3	0	17	4	0	0	0	3	11	5	1	199	7	6	3	16	4	13	6	9	150	96	9	4	3.2%
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	2	1	0	2	0	4	8	1	4	0.1%	
34	0	1	0	0	1	0	0	1	3	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	12	0	0	0	0	1	0	2	0	10	5	1	4	0.2%
Total	0.1%	0.2%	0.5%	0.5%	0.3%	0.1%	0.3%	0.2%	2.0%	1.0%	0.4%	0.3%	3.0%	1.7%	0.6%	0.1%	0.9%	1.4%	0.4%	0.8%	0.4%	34.5%	3.0%	1.1%	2.3%	2.2%	0.8%	2.1%	3.3%	1.0%	24.3%	9.6%	0.2%	0.5%	10000%

Uso de tiempo semanal

A continuación se presenta la figura de uso de tiempo semanal para los usuarios frecuentes de transporte público considerados en el período de este estudio.

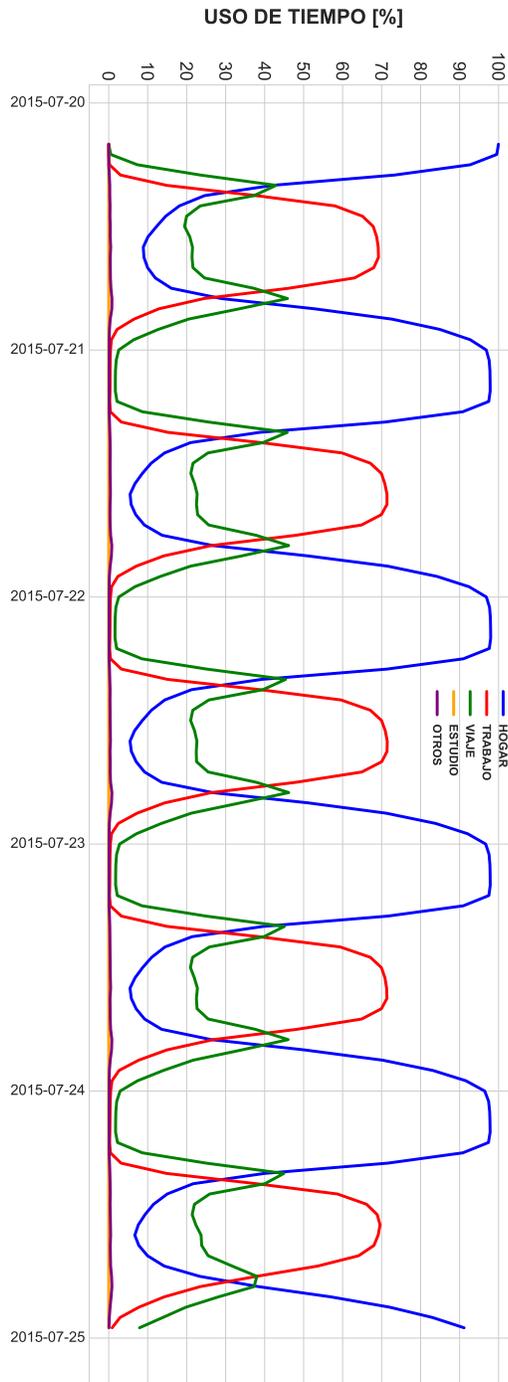


Figura A.1: Uso de tiempo de trabajadores y estudiantes que utilizan el transporte público frecuentemente durante los días laborales del 20 al 24 de julio de 2015.

Tabla IDSE

Tabla A.5: Comunas de Santiago según el índice de desarrollo socioeconómico (IDSE) del año 2014. *Fuente: Gattini et al. (2014)*

Comuna	IDSE [2014]
La Pintana	0.561
Cerro Navia	0.562
San Ramón	0.575
La Granja	0.592
Renca	0.596
Lo Espejo	0.602
San Bernardo	0.605
El Bosque	0.611
Recoleta	0.632
San Joaquín	0.636
Lo Prado	0.648
Huechuraba	0.655
P. A. Cerda	0.657
Conchalí	0.662
Pudahuel	0.667
Peñalolén	0.668
Puente Alto	0.676
Cerrillos	0.677
Quinta Normal	0.677
Macul	0.683
Estación Central	0.685
Quilicura	0.693
La Cisterna	0.724
Independencia	0.731
La Florida	0.741
Maipú	0.741
San Miguel	0.783
Lo Barnechea	0.809
La Reina	0.831
Santiago	0.833
Ñuñoa	0.892
Providencia	0.968
Las Condes	0.97
Vitacura	0.992

Regresión lineal segmentada

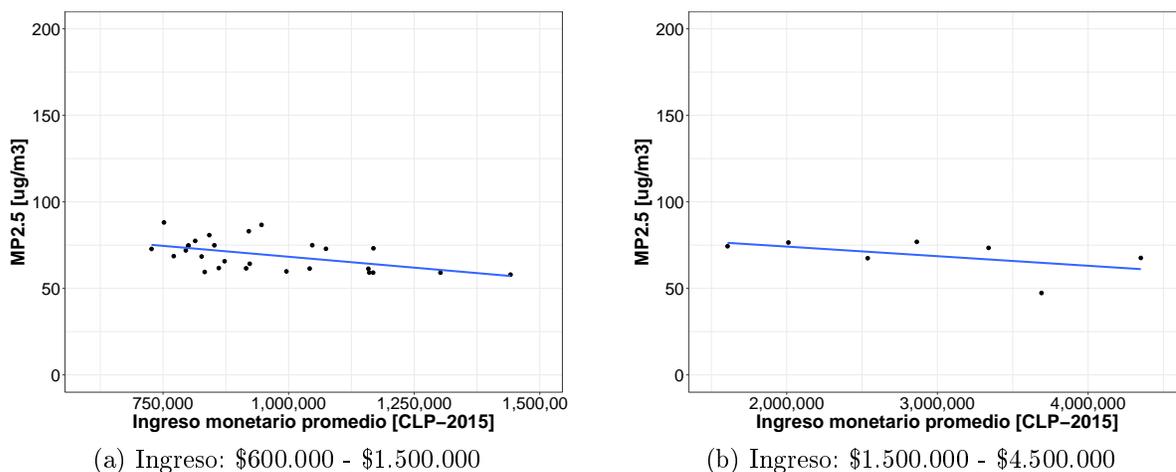


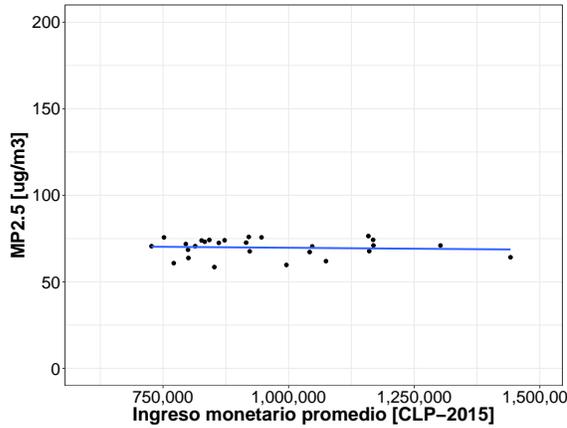
Figura A.2: Regresiones lineales simples en la variable dependiente es la exposición promedio semanal a $MP_{2,5}$ por comuna de residencia con datos de estaciones de monitoreo

Tabla A.6: Parámetros de la regresión aplicado al ingreso (\$600.000 - \$1.500.000) con datos de estaciones de monitoreo

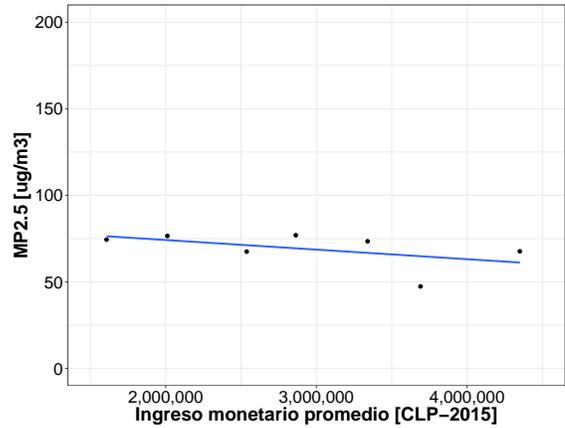
Variable	Coefficiente	Error Est.	Test-T	R^2
Ingreso	$-25,19 \times 10^{-6}$	$8,55 \times 10^{-6}$	-2,95	0,26
Intercepto	93,47	8,32	11,24	

Tabla A.7: Parámetros de la regresión aplicado al ingreso (\$1.500.000 - \$4.500.000) con datos de estaciones de monitoreo

Variable	Coefficiente	Error Est.	Test-T	R^2
Ingreso	$-8,73 \times 10^{-6}$	$-2,25 \times 10^{-6}$	-3,89	0,75
Intercepto	79,25	6,838	11,59	



(a) Ingreso: \$600.000 - \$1.500.000



(b) Ingreso: \$1.500.000 - \$4.500.000

Figura A.3: Regresiones lineales simples en la variable dependiente es la exposición promedio semanal a $MP_{2,5}$ por comuna de residencia con datos de CHIMERE

Tabla A.8: Parámetros de la regresión aplicado al ingreso (\$600.000 - \$1.500.000) con datos de CHIMERE

Variable	Coefficiente	Error Est.	Test-T	R^2
Ingreso	$-2,19 \times 10^{-6}$	$5,76 \times 10^{-6}$	-0,38	0,006
Intercepto	71,86	5,6	-0,381	

Tabla A.9: Parámetros de la regresión aplicado al ingreso (\$1.500.000 - \$4.500.000) con datos de CHIMERE

Variable	Coefficiente	Error Est.	Test-T	R^2
Ingreso	$-5,54 \times 10^{-6}$	$4,13 \times 10^{-6}$	-1,34	0,26
Intercepto	85,23	12,59	6,769	

Tablas exposición promedio a MP_{2,5} (red de monitoreo)

A continuación se presentan las tablas de la exposición promedio diaria para el horizonte temporal analizado ordenadas de mayor exposición a menor exposición por comuna de residencia para el caso con datos de las estaciones de monitoreo de Santiago.

Tabla A.10: Exposición promedio diaria a MP_{2,5} de los usuarios agrupado por comuna de residencia con datos de estaciones de monitoreo (20 de julio de 2015)

Comuna	Exposición promedio a MP _{2,5} [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{-día}$]
Cerro Navia	53
Quinta Normal	52
Lo Prado	51
Pudahuel	50
Renca	49
La Cisterna	48
San Bernardo	48
El Bosque	48
San Ramón	48
Quilicura	48
Lo Espejo	47
Maipú	47
Cerrillos	47
La Pintana	47
Pedro Aguirre Cerda	45
Puente Alto	44
San Miguel	44
Estación Central	43
La Granja	42
Ñuñoa	41
Santiago	41
Conchalí	41
San Joaquín	41
Huechuraba	41
La Florida	40
Independencia	39
Providencia	39
Recoleta	39
Macul	39
Peñalolén	39
La Reina	38
Vitacura	38
Las Condes	37
Lo Barnechea	36

Tabla A.11: Exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ de los usuarios agrupado por comuna de residencia con datos de estaciones de monitoreo (21 de julio de 2015)

Comuna	Exposición promedio a $MP_{2,5}$ [$\mu g/m^3$ - <i>día</i>]
Cerro Navia	102
Pudahuel	99
Quinta Normal	97
Lo Prado	93
Renca	90
Quilicura	84
Maipú	83
El Bosque	83
La Cisterna	82
San Bernardo	82
San Ramón	82
Lo Espejo	82
Cerrillos	82
Pedro Aguirre Cerda	78
La Pintana	77
San Miguel	77
Estación Central	76
La Granja	73
Conchalí	72
Ñuñoa	72
San Joaquín	71
Huechuraba	71
Santiago	71
Puente Alto	70
Recoleta	69
Independencia	69
La Florida	68
Providencia	68
Macul	68
Peñalolén	67
La Reina	62
Las Condes	56
Vitacura	54
Lo Barnechea	42

Tabla A.12: Exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ de los usuarios agrupado por comuna de residencia con datos de estaciones de monitoreo (22 de julio de 2015)

Comuna	Exposición promedio a $MP_{2,5}$ [$\mu g/m^3$ - <i>día</i>]
Cerro Navia	98
Pudahuel	98
Quinta Normal	92
Lo Prado	91
Renca	85
Maipú	84
San Bernardo	84
La Cisterna	84
El Bosque	84
San Ramón	83
Cerrillos	83
Lo Espejo	82
Quilicura	79
Pedro Aguirre Cerda	77
La Pintana	76
San Miguel	74
Estación Central	73
La Granja	72
Ñuñoa	69
San Joaquín	68
Santiago	68
Huechuraba	68
Conchalí	68
Recoleta	66
Providencia	66
La Florida	66
Macul	66
Independencia	65
Puente Alto	65
Peñalolén	65
La Reina	60
Las Condes	56
Vitacura	54
Lo Barnechea	48

Tabla A.13: Exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ de los usuarios agrupado por comuna de residencia con datos de estaciones de monitoreo (23 de julio de 2015)

Comuna	Exposición promedio a $MP_{2,5}$ [$\mu g/m^3$ - <i>día</i>]
Cerro Navia	95
Pudahuel	93
Quinta Normal	86
Renca	85
Lo Prado	84
San Bernardo	83
El Bosque	82
Quilicura	81
San Ramón	80
La Cisterna	80
Lo Espejo	80
Cerrillos	78
La Pintana	78
Maipú	77
Pedro Aguirre Cerda	75
San Miguel	73
La Granja	73
Estación Central	72
Conchalí	71
San Joaquín	70
Ñuñoa	70
Huechuraba	70
Independencia	70
Santiago	69
Macul	69
Recoleta	69
La Florida	68
Providencia	68
Peñalolén	67
La Reina	65
Puente Alto	64
Vitacura	61
Las Condes	59
Lo Barnechea	46

Tabla A.14: Exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ de los usuarios agrupado por comuna de residencia con datos de estaciones de monitoreo (24 de julio de 2015)

Comuna	Exposición promedio a $MP_{2,5}$ [$\mu g/m^3$ - <i>día</i>]
Cerro Navia	92
Pudahuel	90
Quinta Normal	87
Lo Prado	85
La Cisterna	84
El Bosque	84
San Bernardo	84
San Ramón	83
Renca	80
Lo Espejo	79
Maipú	77
Cerrillos	76
La Pintana	76
Quilicura	73
Pedro Aguirre Cerda	72
San Miguel	72
La Granja	68
Estación Central	68
Ñuñoa	63
San Joaquín	63
Puente Alto	63
Santiago	62
Conchalí	62
Huechuraba	62
Recoleta	60
La Florida	60
Providencia	60
Independencia	60
Macul	59
Peñalolén	58
La Reina	50
Las Condes	41
Vitacura	40
Lo Barnechea	27

Exposición promedio a MP_{2,5} (CHIMERE)

A continuación se presentan las tablas de la exposición promedio diaria para el horizonte temporal analizado por comuna de residencia para el caso del modelo CHIMERE. Además, se presentan las distribuciones de la exposición por comuna de trabajo y estudio.

Tabla A.15: Exposición promedio diaria a MP_{2,5} de los usuarios agrupado por comuna de residencia con datos de CHIMERE (20 de julio de 2015)

Comuna	Exposición promedio a MP _{2,5} [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{-día}$]
Las Condes	50
Santiago	49
Providencia	48
Ñuñoa	48
Quinta Normal	47
Estación Central	46
Pedro Aguirre Cerda	46
San Miguel	46
Vitacura	46
Cerrillos	46
La Reina	46
Independencia	46
Lo Prado	46
Cerro Navia	46
Pudahuel	45
Maipú	45
Lo Espejo	45
Recoleta	44
La Cisterna	44
San Joaquín	44
Macul	43
San Ramón	43
Renca	42
Peñalolén	42
Conchalí	42
Huechuraba	42
La Granja	41
La Florida	41
El Bosque	40
San Bernardo	38
Puente Alto	38
La Pintana	38
Quilicura	37
Lo Barnechea	37

Tabla A.16: Exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ de los usuarios agrupado por comuna de residencia con datos de CHIMERE (21 de julio de 2015)

Comuna	Exposición promedio a $MP_{2,5}$ [$\mu g/m^3$ - <i>día</i>]
Pudahuel	78
Lo Prado	78
Pedro Aguirre Cerda	77
San Miguel	77
Santiago	77
Cerrillos	76
Quinta Normal	76
Ñuñoa	76
Estación Central	76
Providencia	75
San Joaquín	74
Lo Espejo	74
Independencia	73
Maipú	73
La Cisterna	73
Cerro Navia	73
Macul	72
La Granja	72
Las Condes	72
San Ramón	72
La Florida	70
Recoleta	69
Conchalí	68
La Reina	68
Renca	67
Peñalolén	66
El Bosque	66
Vitacura	65
La Pintana	64
Huechuraba	63
Puente Alto	62
San Bernardo	59
Quilicura	59
Lo Barnechea	47

Tabla A.17: Exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ de los usuarios agrupado por comuna de residencia con datos de CHIMERE (22 de julio de 2015)

Comuna	Exposición promedio a $MP_{2,5}$ [$\mu g/m^3$ - <i>día</i>]
Pudahuel	78
Cerro Navia	77
Quinta Normal	77
Lo Prado	75
Estación Central	73
Maipú	73
Providencia	72
Cerrillos	72
Pedro Aguirre Cerda	72
Santiago	71
San Miguel	71
Lo Espejo	71
Independencia	70
La Cisterna	70
Ñuñoa	69
Recoleta	69
Renca	69
Las Condes	69
San Joaquín	68
Conchalí	68
San Ramón	68
La Granja	67
Macul	66
La Florida	65
Vitacura	65
Huechuraba	63
El Bosque	63
La Pintana	59
Puente Alto	59
La Reina	58
Peñalolén	58
San Bernardo	57
Quilicura	57
Lo Barnechea	45

Tabla A.18: Exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ de los usuarios agrupado por comuna de residencia con datos de CHIMERE (23 de julio de 2015)

Comuna	Exposición promedio a $MP_{2,5}$ [$\mu g/m^3$ - <i>día</i>]
Ñuñoa	98
Providencia	97
San Miguel	96
Santiago	96
San Joaquín	94
Las Condes	92
Pedro Aguirre Cerda	92
Quinta Normal	92
Recoleta	92
Estación Central	91
Independencia	91
Macul	91
Cerro Navia	91
La Reina	90
Conchalí	89
Pudahuel	88
Lo Prado	88
Huechuraba	88
La Cisterna	87
Lo Espejo	87
Vitacura	87
Cerrillos	86
La Florida	85
Peñalolén	85
Maipú	85
Renca	84
San Ramón	84
La Granja	82
El Bosque	79
Quilicura	78
San Bernardo	75
La Pintana	74
Puente Alto	73
Lo Barnechea	63

Tabla A.19: Exposición promedio diaria a $MP_{2,5}$ de los usuarios agrupado por comuna de residencia con datos de CHIMERE (24 de julio de 2015)

Comuna	Exposición promedio a $MP_{2,5}$ [$\mu g/m^3$ - <i>día</i>]
Cerro Navia	92
Pudahuel	92
Conchalí	89
Renca	88
Quinta Normal	88
Recoleta	88
Ñuñoa	87
Independencia	87
Lo Prado	87
Providencia	86
Santiago	85
San Miguel	85
San Joaquín	85
Macul	84
Estación Central	84
Pedro Aguirre Cerda	84
Maipú	83
La Cisterna	82
Cerrillos	82
Las Condes	81
Lo Espejo	81
Quilicura	81
San Ramón	80
La Florida	79
La Reina	78
Huechuraba	78
La Granja	78
El Bosque	76
Peñalolén	75
La Pintana	73
Vitacura	72
San Bernardo	70
Puente Alto	68
Lo Barnechea	42

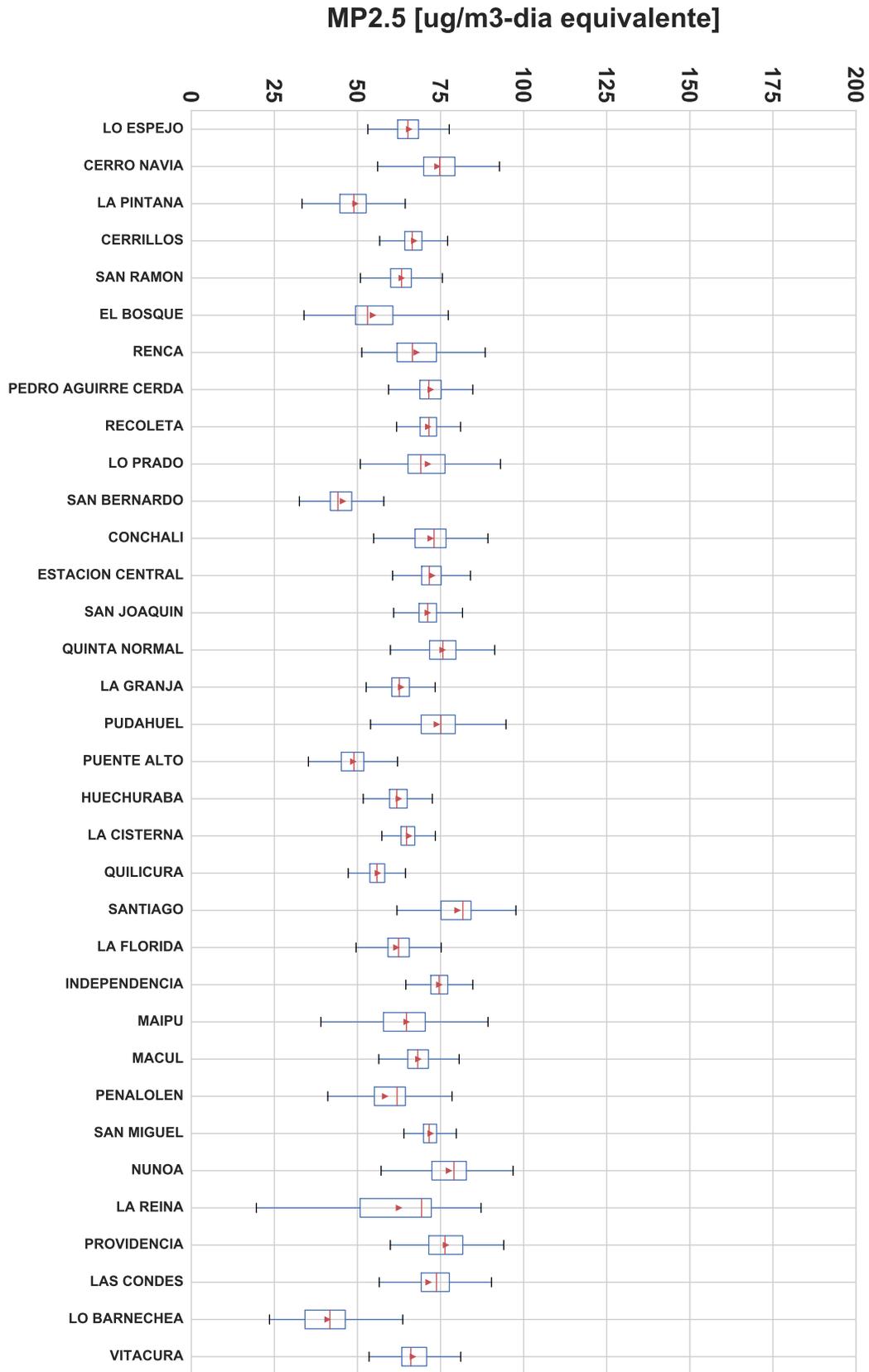


Figura A.4: Distribución de la exposición promedio diaria a MP_{2,5} durante actividad hogar agrupado por comuna de residencia con datos de CHIMERE. Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja representan el promedio y la mediana respectivamente

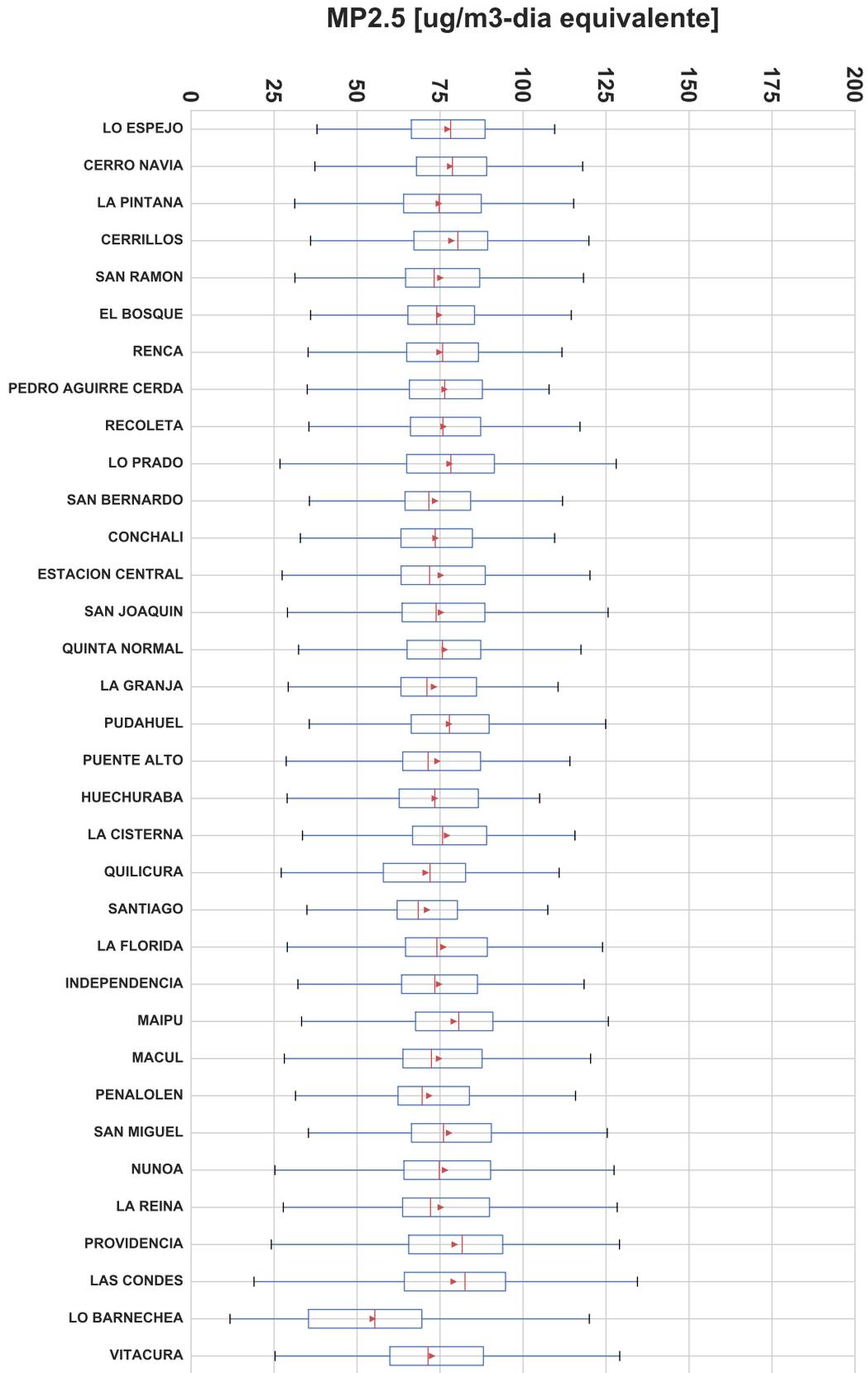


Figura A.5: Distribución de la exposición promedio diaria a MP_{2,5} durante actividad trabajo agrupado por comuna de residencia con datos de CHIMERE. Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja representan el promedio y la mediana respectivamente

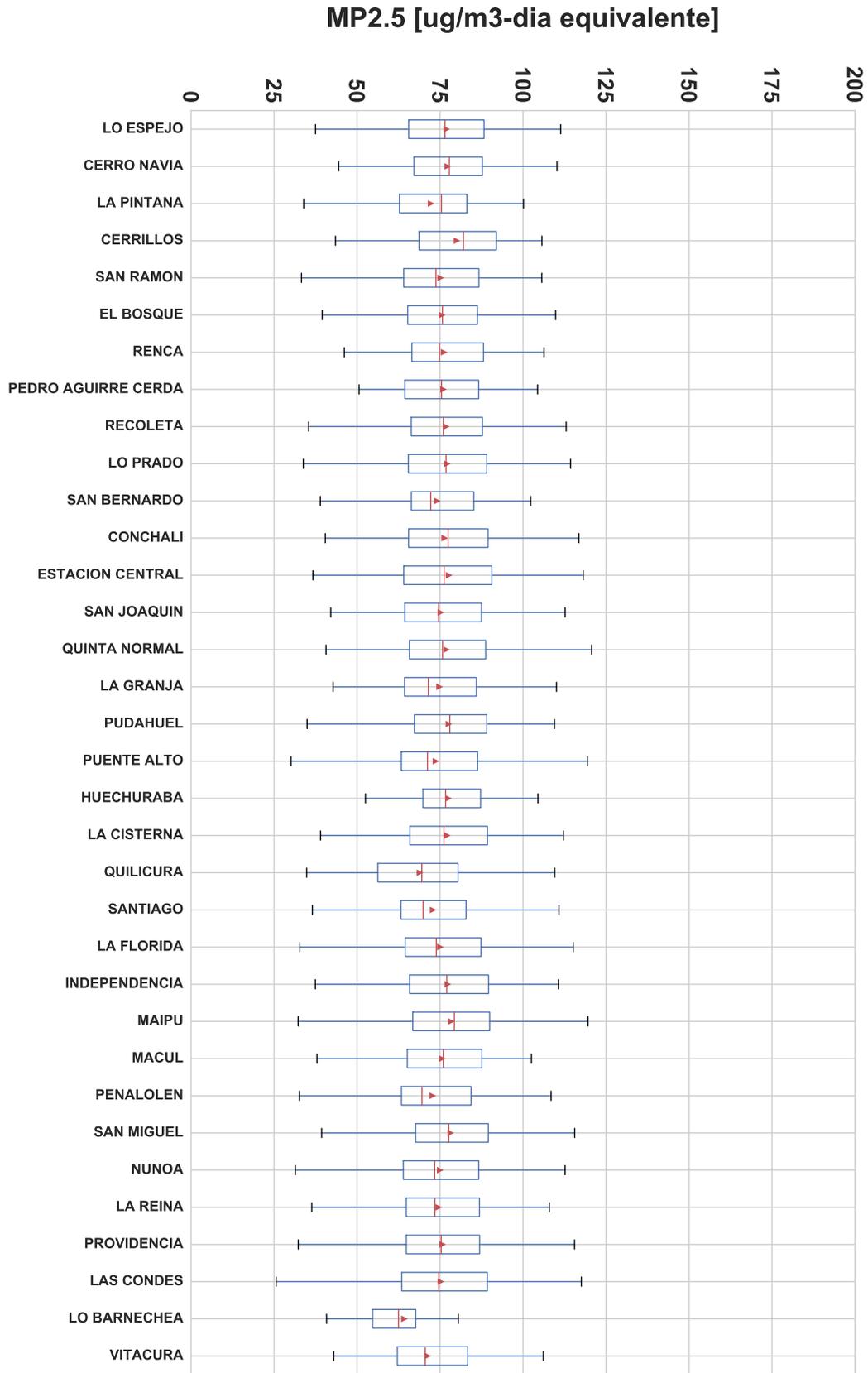


Figura A.6: Distribución de la exposición promedio diaria a MP_{2,5} durante actividad estudio agrupado por comuna de residencia con datos de CHIMERE. Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja representan el promedio y la mediana respectivamente

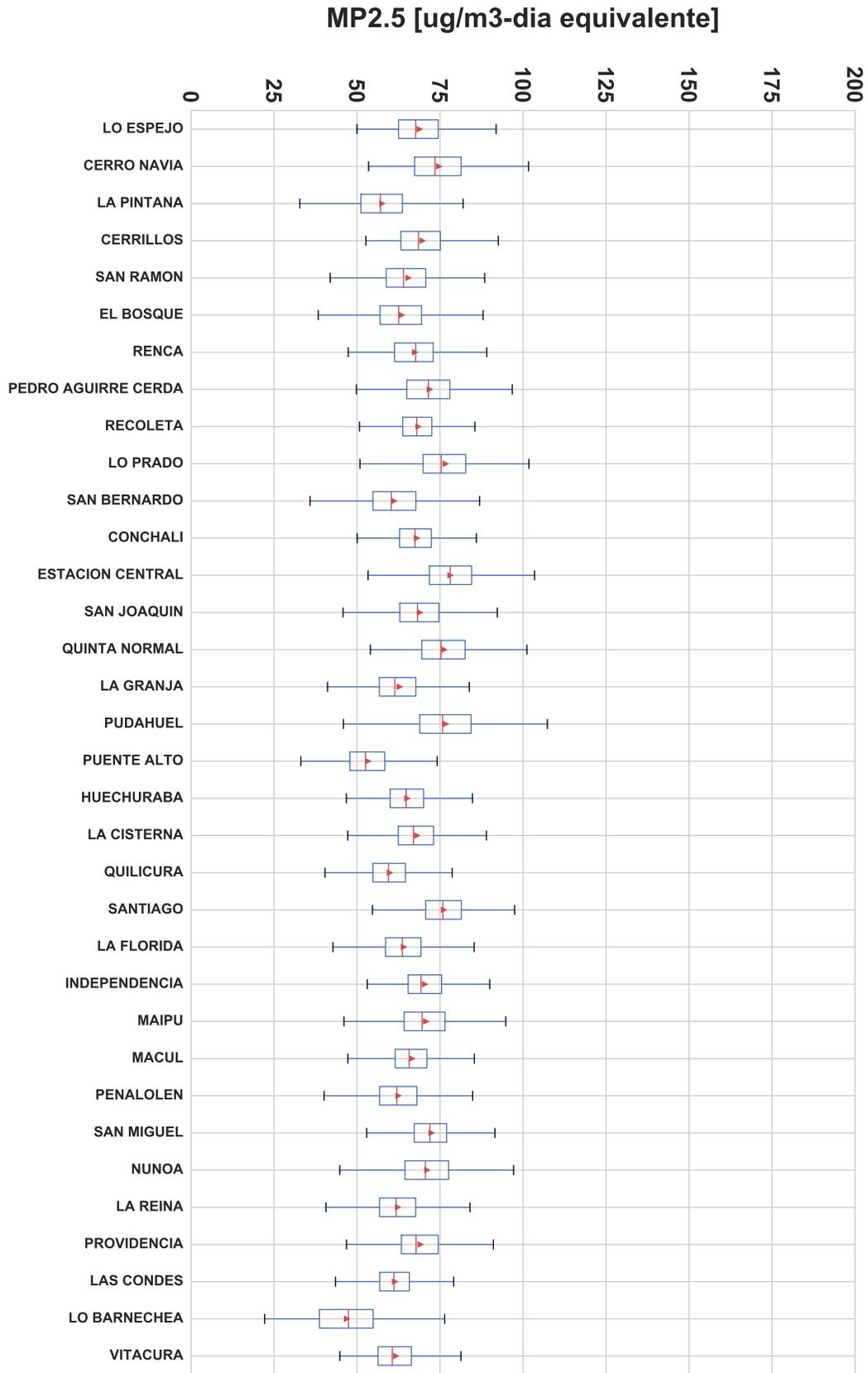


Figura A.7: Distribución de la exposición promedio diaria a MP_{2,5} durante actividad viaje agrupado por comuna de residencia con datos de CHIMERE. Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja representan el promedio y la mediana respectivamente

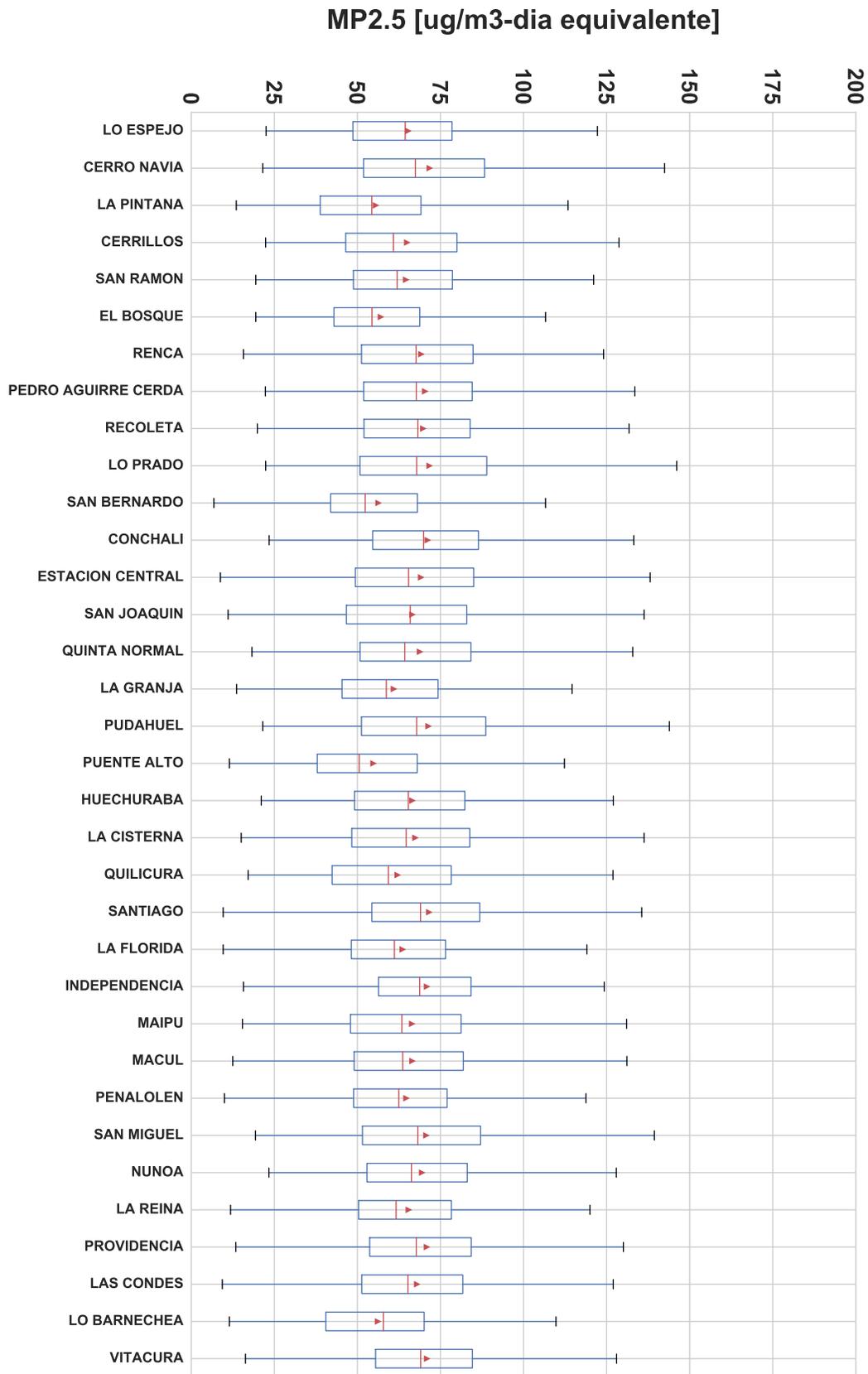


Figura A.8: Distribución de la exposición promedio diaria a MP_{2,5} durante actividad otros agrupado por comuna de residencia con datos de CHIMERE. Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja representan el promedio y la mediana respectivamente

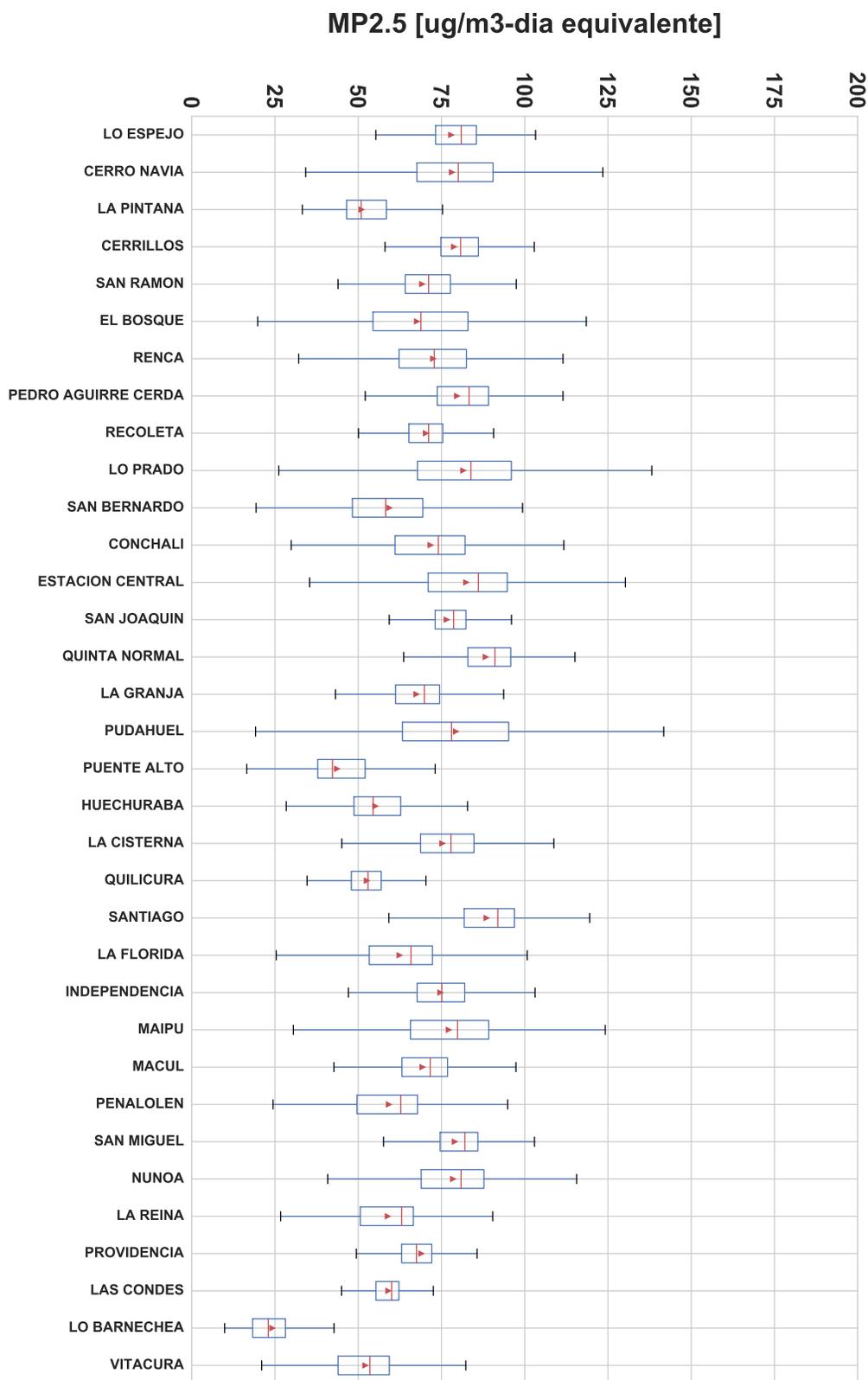


Figura A.9: Distribución de la exposición promedio diaria a MP_{2,5} durante actividad trabajo agrupado por comuna de trabajo con datos de CHIMERE. Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja representan el promedio y la mediana respectivamente

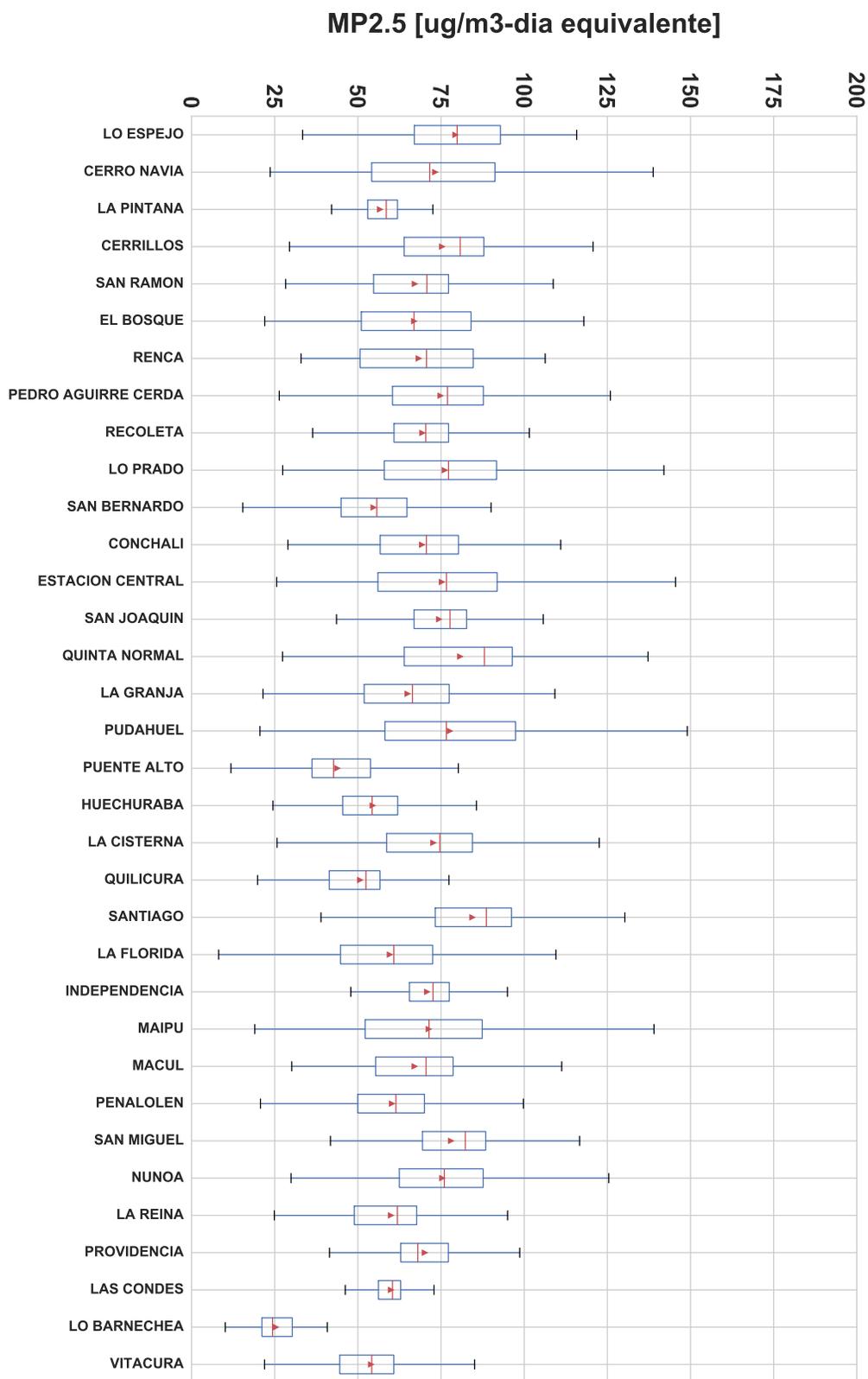


Figura A.10: Distribución de la exposición promedio diaria a MP_{2,5} durante actividad estudio agrupado por comuna de estudio con datos de CHIMERE. Triángulos y líneas rojas en los diagramas de caja representan el promedio y la mediana respectivamente

Tabla A.20: Porcentaje de exposición que aporta cada actividad en la exposición promedio diaria a MP_{2,5} en trabajadores con datos de CHIMERE

Comuna	Exposición en hogar [%]	Exposición en trabajo [%]	Exposición en viaje [%]	Exposición en otros [%]
San Bernardo	38	52	8	2
La Pintana	39	52	6	2
Puente Alto	40	52	5	3
El Bosque	43	49	6	2
Quilicura	45	45	7	3
Lo Barnechea	45	45	5	4
Maipú	45	45	6	4
Lo Espejo	46	45	6	3
Cerrillos	46	45	6	4
La Granja	47	46	5	3
La Florida	47	45	4	3
San Ramón	47	45	4	3
Peñalolén	47	44	4	4
La Cisterna	47	44	4	4
Renca	48	44	5	3
La Reina	49	43	4	4
Huechuraba	49	43	5	3
Cerro Navia	49	41	6	4
Macul	50	43	3	4
Pudahuel	50	41	5	4
Vitacura	50	42	5	4
Lo Prado	50	42	4	5
Pedro Aguirre Cerda	50	42	5	3
San Miguel	50	42	3	5
San Joaquín	51	42	4	4
Recoleta	51	41	4	4
Conchalí	51	40	5	4
Estación Central	51	41	4	4
Quinta Normal	51	41	5	3
Independencia	52	40	5	3
Las Condes	52	41	3	5
Ñuñoa	53	40	3	4
Providencia	55	39	2	5
Santiago	56	37	3	5

Tabla A.21: Porcentaje de exposición que aporta cada actividad en la exposición promedio diaria a MP_{2,5} en estudiantes con datos de CHIMERE

Comuna	Exposición en hogar [%]	Exposición en estudio [%]	Exposición en viaje [%]	Exposición en otros [%]
San Bernardo	43	47	7	3
Lo Barnechea	43	47	5	5
Puente Alto	45	46	5	5
La Pintana	45	45	6	4
El Bosque	49	42	6	3
Quilicura	50	40	6	4
Cerrillos	50	40	5	4
Peñalolén	51	40	4	5
La Cisterna	51	40	4	5
Huechuraba	51	39	5	5
Maipú	51	39	5	5
Lo Espejo	52	38	6	4
La Granja	52	40	4	4
La Florida	52	39	4	4
San Ramón	52	40	4	4
La Reina	52	38	4	5
Renca	53	38	5	4
Macul	53	38	3	5
Lo Prado	54	38	3	5
Cerro Navia	54	36	6	4
Estación Central	55	38	3	5
San Miguel	55	37	3	5
Independencia	55	37	5	4
Conchalí	55	35	5	5
Pedro Aguirre Cerda	55	36	5	4
Recoleta	55	36	3	5
Vitacura	56	35	4	5
San Joaquín	56	36	3	5
Quinta Normal	56	36	4	4
Pudahuel	56	35	4	5
Las Condes	56	36	3	5
Ñuñoa	58	34	3	5
Santiago	59	34	3	5
Providencia	59	33	2	5