

UCH-FC  
Q. Ambiental  
M 9718  
C-1



FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

“TRANSPORTE ATMOSFÉRICO DE MATERIAL PARTICULADO  
FINO Y CARBONO NEGRO DESDE SANTIAGO A UN SECTOR  
CORDILLERANO”

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de:

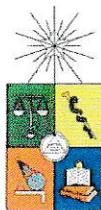
**Químico Ambiental**

**Alicia Muñoz Araya**



Director de Seminario de Título: Dr. Ernesto Gramsch Labra.  
Profesor Patrocinante: Dr. Manuel Leiva Guzmán.

Enero 2016  
Santiago – Chile



## INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por la Srta.

**ALICIA ELENA MUÑOZ ARAYA**

“TRANSPORTE ATMOSFÉRICO DE MATERIAL PARTICULADO FINO Y CARBONO NEGRO DESDE SANTIAGO A UN SECTOR CORDILLERANO”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Química Ambiental

### COMISIÓN DE EVALUACIÓN

Dr. Ernesto Gramsch

**Director Seminario de Título**

Dr. Manuel Leiva

**Profesor Patrocinante**

Dr. Richard Toro

**Presidente**

Dr. María A. Rubio

**Corrector**

The image shows four handwritten signatures in blue ink, each on a horizontal line. From top to bottom, they correspond to the names listed on the left: Ernesto Gramsch, Manuel Leiva, Richard Toro, and María A. Rubio. To the right of the signatures is a circular stamp with the text "FACULTAD DE CIENCIAS" at the top, "BIBLIOTECA CENTRAL" in the middle, and "U. DE CHILE" at the bottom, flanked by two stars.

Santiago de Chile, 2016



Mi historia comienza en verano, el día 4 de Febrero del año 1992 en Santiago de Chile. Soy la segunda hija de mis padres, quienes con mucho cariño me recibieron y educaron de la mejor forma que puedo imaginar.

Desde pequeña, mis padres me enseñaron la naturaleza, y de muchos paseos aprendí de la belleza natural de mi país. En el colegio tenía aptitudes científicas y matemáticas, las cuales me llevaron a interesarme por la carrera de Química Ambiental.

En la Universidad de Chile pude entender la base de los ciclos biogeoquímicos y me interesé por los procesos atmosféricos, llegando a conocer al Dr. Ernesto Gramsch, con quien pude aprender a enfrentar un estudio de transporte atmosférico.

Ahora pretendo desplegar mis alas y tomar todo el conocimiento que el mismo ambiente me ofrece.

## AGRADECIMIENTOS

Parto por agradecer al Proyecto FONDECYT N° 1151117 y al Ministerio del Medio Ambiente de Chile por otorgarme las herramientas que facilitaron mi estudio. Claro que mi participación en él no habría sido posible sin mi Director de Tesis, Dr. Ernesto Gramsch, quien con su sabiduría y paciencia logró apoyarme en todo este proceso, gracias. Detrás de él, mi trabajo fue incentivado por el Laboratorio de Óptica y Semiconductores de la Universidad de Santiago y el Centro de Investigación Premio Nobel Mario Molina.

Durante todo este período de tesis nunca faltaron las inigualables críticas constructivas por parte de mi Director Patrocinante, Dr. Manuel Leiva, las cuales me hacían sentir el apoyo de mi facultad, gracias.

Dentro de la campaña de monitoreo, las ayudas del centro de esquí La Parva, en específico del Señor Raúl Anguita, hicieron posible lo imposible con su amabilidad y gran organización. Ayudas que igualaron a las de mi amigo Jonás, quien siempre me acompañó con una sonrisa.

Inolvidables son el cariño y las palabras de ánimo de mis padres y hermanas, gracias por ser un lindo lugar de amor. A mi gran familia también le agradezco la simpatía que irradian, en conjunto con sus vidas que me motivan a seguir sus pasos.

Una de las mejores presencias fue la de Maximiliano, gracias por ser mi persona más agradable. También agradezco a mis amigos/compañeros, espero que sigamos cada uno por un camino que se entrecruce entre nosotros.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>I</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1	Antecedentes Generales .....	1
1.1.1	Material Particulado y la degradación de la calidad de aire .....	1
1.1.2	Composición del Material Particulado .....	4
1.1.3	Relación CN/MP <sub>2,5</sub> .....	6
1.2	Transporte atmosférico y otros factores de las concentraciones de contaminantes .....	8
1.2.1	Santiago de Chile como caso de estudio .....	10
1.3	Hipótesis .....	13
1.4	Objetivo General .....	13
1.4.1	Objetivos Específicos .....	13
<b>II</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	14
2.1	Descripción de la zona de estudio .....	14
2.2	Sitios de Monitoreo.....	16
2.3	Mediciones de las concentraciones de los contaminantes y de los parámetros meteorológicos.....	20
2.4	Análisis de datos .....	22
2.4.1	Análisis de series temporales.....	22
2.4.2	Análisis de la relación entre los parámetros contaminantes y meteorológicos .....	25
2.4.3	Análisis del tiempo de transporte .....	26
<b>III</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	28
3.1	Completitud de la información de monitoreo de contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas .....	28
3.2	Variabilidad espacial y temporal de los datos de contaminación .....	31
3.2.1	Análisis de la variabilidad temporal a escala mensual .....	31
3.2.2	Análisis de la variabilidad temporal a escala diaria .....	38
3.2.3	Análisis de la variabilidad temporal a escala diurna .....	41
3.3	Variabilidad espacial y temporal de los datos de meteorología .....	44

3.3.1	Análisis de la variabilidad temporal a escala mensual .....	44
3.3.2	Análisis de la variabilidad temporal a escala horaria .....	50
3.4	Relación entre las concentraciones de los contaminantes medidos .....	55
3.4.1	Relación de MP <sub>2,5</sub> y CN medidos en LP .....	56
3.4.2	Relación del CN en las tres estaciones de monitoreo .....	57
3.4.3	Relación del CN entre LC-CF.....	58
3.4.4	Relación del CN entre LC-LP.....	59
3.5	Relación entre las concentraciones de contaminantes y los parámetros meteorológicos .....	60
3.5.1	Rosas de Contaminantes.....	61
3.5.2	Gráficos bipolares de concentraciones .....	63
3.6	Tiempo del transporte atmosférico .....	68
IV	CONCLUSIONES .....	69
V	BIBLIOGRAFÍA.....	71
VI	ANEXOS .....	76
6.1	Anexos de Materiales y Métodos.....	76
6.2	Anexos Resultados y Discusión .....	78
6.2.1	Variabilidad espacial y temporal de los contaminantes .....	78
6.2.2	Variabilidad espacial y temporal de los datos meteorológicos .....	79

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Resumen de los resultados de las emisiones clasificadas por sector (USACH, 2013).....	11
<b>Tabla 2</b> Estaciones de monitoreo utilizadas durante el estudio en la zona central de Chile. ....	17
<b>Tabla 3</b> Resultados de ANOVA para los datos mensuales de MP <sub>2,5</sub> en LC, CN en CF, MP <sub>2,5</sub> y CN en LP .....	32
<b>Tabla 4</b> Valores de los promedios mensuales, sus desviaciones estándar, máximos y mínimos de los datos de MP <sub>2,5</sub> en Las Condes.....	34
<b>Tabla 5</b> Valores de los promedios mensuales, sus desviaciones estándar, máximos y mínimos de los datos de CN en Camino a Farellones. ....	35
<b>Tabla 6</b> Valores de los promedios mensuales, sus desviaciones estándar, máximos y mínimos, número de los datos horarios de MP <sub>2,5</sub> y CN en La Parva. ....	37
<b>Tabla 7</b> Resultados de ANOVA para los datos semanales de MP <sub>2,5</sub> en LC, CN en CF, MP <sub>2,5</sub> y CN en LP .....	39
<b>Tabla 8</b> Resultados de ANOVA para los datos semanales de MP <sub>2,5</sub> en LC, CN en CF, MP <sub>2,5</sub> y CN en LP .....	42
<b>Tabla 9</b> Relaciones entre contaminantes a tratar en esta sección, según estación de monitoreo y tiempo.....	55
<b>Tabla 10</b> Datos del Censo 2012 en la ruta G-21 en el kilómetro 21. Camta: camionetas y camiones de 2 ejes; Camsre: camiones remolque; Varios: locomoción colectiva, motos, bicicletas y otros. ....	76
<b>Tabla 11</b> Resultados del Test de Bonferroni para los datos mensuales del MP <sub>2,5</sub> en Las Condes .....	78
<b>Tabla 12</b> Resultados del Test de Bonferroni para los datos mensuales del CN en Camino a Farellones.....	78
<b>Tabla 13</b> Resultados del Test de Bonferroni para los datos mensuales del MP <sub>2,5</sub> en La Parva .....	79
<b>Tabla 14</b> Resultados del Test de Bonferroni para los datos mensuales del CN en La Parva .....	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Efectos del carbono negro en el clima y una comparación con los gases de efecto invernadero. (Fuente: USEPA, 2010) .....	7
<b>Figura 2</b> Sistemas diurnos de la circulación de los vientos en el verano de la cuenca de Santiago, en el día (a) y la noche (b). (Fuente: Romero y col, 1999) .....	9
<b>Figura 3</b> Contribuciones de MP <sub>2,5</sub> promedio anual para el 2012 por los diferentes sectores tomados en el inventario (USACH, 2013). .....	11
<b>Figura 4</b> Imágenes satelitales de la región estudiada, desde una visión país (a), siguiendo por una regional (b), hasta una visión de las estaciones monitoreadas entre Santiago y Farellones (c), con su perfil de inclinación (d). LC: Las Condes; CF: Camino a Farellones; y LP: La Parva. (Fuente: Google Earth). .....	15
<b>Figura 5</b> Imágenes de la estación de monitoreo Las Condes: (a) imagen satelital del entorno (Google Earth); (b) y (c) vista norte de las estaciones de monitoreo de los parámetros de calidad de aire, MP <sub>2,5</sub> , y de los parámetros meteorológicos en altura, respectivamente (Fuente Propia). .....	18
<b>Figura 6</b> Imágenes de la estación de monitoreo Camino a Farellones: (a) imagen satelital del entorno (Google Earth); (b) vista norte del Kiosko Juanita (Fuente propia); (c) y (d) instalación del simca y de una UPS con la salida de manguera (Fuente propia). .....	19
<b>Figura 7</b> Imágenes de la estación de monitoreo La Parva: (a) imagen satelital del entorno (Google Earth); (b) vista norte de la estación cercada con los paneles solares como fuente de energía (Fuente Propia); (c) y (d) son las instalaciones para los instrumentos que miden los parámetros meteorológicos y contaminantes, respectivamente (Fuente propia). .....	20
<b>Figura 8</b> Rosa de vientos realizada por R Project. ....	24
<b>Figura 9</b> Promedio de concentraciones horarias de MP <sub>10</sub> en la Escuela Intermedia Nelson (NIS), Consejo de la Ciudad de Nelson (NCC) y en la estación de bomberos de la ciudad de Nelson (NFS). ....	25
<b>Figura 10</b> Ejemplos de una rosa de concentraciones (a) y una gráfica polar (b) para NO <sub>x</sub> . .....	26
<b>Figura 11</b> Perfil diurno de CN en dos sitios (a) y gráfica de los factores de correlación. ....	27
<b>Figura 12</b> Gráficos de todos los datos horarios de todos los contaminantes monitoreados y sus porcentajes de disponibilidad mensual. MP= MP <sub>2,5</sub> , CN= CN, LC= Las Condes, LP= La Parva.....	29
<b>Figura 13</b> Gráficos de todos los datos horarios de los parámetros meteorológicos monitoreados y sus porcentajes de disponibilidad mensual. WD= Dirección	

	del viento, WS= Velocidad del viento, TP= Temperatura, RH= Humedad Relativa, LC= Las Condes y LP= La Parva. ....	31
<b>Figura 14</b>	Variabilidad mensual de los datos de MP <sub>2,5</sub> en LC (a), CN en el CF (b), MP <sub>2,5</sub> y CN en LP (c y d), con las cuadrículas ensombrecidas representando el intervalo de confianza al 95%. ....	32
<b>Figura 15</b>	Variabilidad diaria de los datos de MP <sub>2,5</sub> en LC (a), CN en el CF (b), MP <sub>2,5</sub> y CN en LP (c y d), con las cuadrículas ensombrecidas representando el intervalo de confianza al 95%. ....	38
<b>Figura 16</b>	Variabilidad horaria de los datos de MP <sub>2,5</sub> en LC (a), CN en el CF (b), MP <sub>2,5</sub> y CN en LP (c y d), con las áreas ensombrecidas representando el intervalo de confianza al 95%. ....	41
<b>Figura 17</b>	Rosas de vientos para todos los meses monitoreados en la estación Las Condes. ....	46
<b>Figura 18</b>	Rosas de vientos para todos los meses monitoreados en la estación La Parva. ....	47
<b>Figura 19</b>	Variabilidad mensual de los datos de velocidad del viento (WS-a), temperatura (TP-b) y humedad relativa (RH-c) en Las Condes (LC) y La Parva (LP), con las cuadrículas representando el intervalo de confianza al 95%. ....	48
<b>Figura 20</b>	Rosa de los vientos promedio para cada hora en la estación Las Condes. ....	51
<b>Figura 21</b>	Rosas de los vientos promedio de las horas del día en La Parva. ....	52
<b>Figura 22</b>	Variabilidad horaria de los datos de velocidad del viento (WS-a), temperatura (TP-b) y humedad relativa (RH-c) en Las Condes (LC) y La Parva (LP), con las áreas ensombrecidas representando el intervalo de confianza al 95%. ...	53
<b>Figura 23</b>	Gráfico de las concentraciones promedios mensuales de MP <sub>2,5</sub> y CN en LP junto con los porcentajes promedios mensuales de CN en MP <sub>2,5</sub> . ....	56
<b>Figura 24</b>	Variabilidad horaria de los datos de CN estimado en LC (CN*LC), CN medido en CF (CN.CF), CN estimado y medido en LP (CN*.LP y CN.LP) para una semana de Febrero, con las áreas ensombrecidas representando el intervalo de confianza al 95%. ....	57
<b>Figura 25</b>	Variabilidad diaria de los datos de CN estimado en LC (CN.LC) y CN medido en CF (CN.CF) en Julio y Agosto, con las áreas ensombrecidas representando el intervalo de confianza al 95%. ....	59
<b>Figura 26</b>	Variabilidad mensual (izquierda) y horaria (derecha) de los datos de CN en LC y LP para los meses de Diciembre-Abril, con las áreas ensombrecidas representando el intervalo de confianza al 95%. ....	60
<b>Figura 27</b>	Matrices de correlación de los parámetros contaminantes contra los meteorológicos en Las Condes (izquierda) y La Parva (derecha). ....	60
<b>Figura 28</b>	Rosa de contaminantes para el MP <sub>2,5</sub> en la estación de LC desde Diciembre a Abril. ....	61
<b>Figura 29</b>	Rosas mensuales de contaminantes para el CN en la estación de LP. ....	62

<b>Figura 30</b>	Rosas de contaminantes para el CN en la estación de LP entre las 10-19 horas (izquierda) y entre las 20-9 horas (derecha).....	63
<b>Figura 31</b>	Gráficas polares de las concentraciones de MP <sub>2,5</sub> , velocidad y dirección de los vientos en LC en el periodo de verano, para el día (izquierda) y la noche (derecha).....	64
<b>Figura 32</b>	Gráficas polares mensuales de las concentraciones de CN en LP.....	65
<b>Figura 33</b>	Gráficos polares para el CN en la estación de LP entre las 10-19 horas (izquierda) y entre las 20-9 horas (derecha).....	66
<b>Figura 34</b>	Imagen satelital con la circulación de los vientos supuesta, la salida de los vientos de Santiago que atraviesan la ruta del Camino a Farellones (rojos), la bifurcación de los vientos que entran por el estero Yerba Loca hasta subir a LP (amarillos) o que siguen una ruta a la derecha que luego aumenta su altura hasta llegar a LP (verde).....	67
<b>Figura 35</b>	Perfil del factor de correlación dependiendo del tiempo desplazado de los perfiles de CN en LP y MP <sub>2,5</sub> en LP, en horas para cada mes de verano.....	68
<b>Figura 36</b>	Medición de la calibración para el SIMCA (R) comparándolo con el Sunset (Thermo EC). .....	77
<b>Figura 37</b>	Variabilidad de los datos horarios de la humedad absoluta en LC y LP. ....	80

## LISTA DE ABREVIATURAS

CF	Camino a Farellones
CN	Carbono Negro ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )
CONAMA	Comisión Nacional del Medio Ambiente
LC	Las Condes
LP	La Parva
MP <sub>2,5</sub>	Material Particulado de tamaño menor o igual a 2,5 $\mu\text{m}$ ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )
RH	Humedad Relativa (%)
SIMCA	Sistema de Medición del Coeficiente de Absorción
TP	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
USEPA	Agencia de la Protección Ambiental de Estados Unidos
WD	Dirección del viento ( $^{\circ}$ )
WS	Velocidad del viento (m/s)

## RESUMEN

El conocimiento de la circulación del aire en Santiago aporta información sobre el comportamiento atmosférico de la Macro Zona Central de Chile. Según como se muevan las masas de aire será posible discriminar zonas geográficas que estarían afectadas por el aire contaminado de Santiago. De esta manera sería posible proponer políticas ambientales para las zonas afectadas, las cuales dependerían del ecosistema de la zona, siendo más importante las regulaciones cuando en la zona hay áreas sensibles a la contaminación, como parques nacionales o glaciares.

Este seminario de título evalúa el transporte atmosférico entre Santiago y una zona de la Cordillera de los Andes, Farellones, específicamente en el período desde Diciembre del 2014 a Agosto del 2015. Se midieron las concentraciones de Material Particulado 2,5 y Carbono Negro en tres puntos colineales dentro de la trayectoria desde Santiago a Farellones. Además, se registraron los parámetros meteorológicos (velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa) en el inicio y término de la trayectoria.

Los resultados demostraron que el transporte atmosférico ocurría en los meses de calor y en específico en una semana de Febrero. Los perfiles diurnos de CN en las tres estaciones tenían un comportamiento similar y con los máximos desplazados temporalmente según la distancia a Santiago. Al relacionar los datos de concentraciones y los vientos en el sitio de monitoreo de Farellones se demuestra el transporte atmosférico desde Santiago en Diciembre, Febrero y Marzo. Por último se calculó un tiempo promedio de transporte en los meses de verano, igual a 6,4 horas.

En el estudio también se logró distinguir una variabilidad estacional en las concentraciones medidas en Farellones, con bajas valores en los meses de invierno, lo que podría estar relacionado a un transporte más débil desde el valle y una capa de mezcla somera.

## ABSTRACT

The knowledge of the air motion in Santiago can provide information about the atmospheric behavior of Chile's Central Macro Zone. Depending on the circulation of the air it should be possible to distinguish the geographic zones that would be most affected by Santiago's air pollution. In this way, it should be possible to propose an environmental policy for the affected zones, depending on the ecosystem's zone it will be more important regulated when in the zone are sensitive areas to pollution, like national parks or glaciers.

This study evaluate the atmospheric transport between Santiago and an Andes Cordillera zone, Farellones, specifically in the period from December 2014 to August 2015. The concentration of Particulate Matter 2.5 and Black Carbon was sampled at three collinear points on the track between Santiago and Farellones. Also, meteorological parameters (wind speed and direction, temperature and relative humidity) were registered at the two endpoints of the track.

The results proved the atmospheric transport during the warm months, and specific in a February's week. The shapes of the daily profiles of CN concentrations at the three stations was similar and showed time-shifted maximum values depending on the distance to Santiago, at the February's week. The association between the CN concentrations and the winds registered at Farellones prove an atmospheric transport on December, February and March. The average time of the atmospheric transport in warm months is 6,4 hours.

The study further showed a seasonal variability in the concentrations measured at Farellones, with lower values in the cold months, which may be related to a weaker transport from the valley and a shallower mixed layer.

la atmósfera, definiendo la forma, tamaño, superficie, densidad y su composición química o biológica (Morales, 2006).

El MP es uno de los contaminantes responsables del deterioro de la calidad del aire en las grandes áreas urbanas (Molina y Molina, 2004; OMS, 2014; Zereini y Wiseman, 2010). Ejemplo de ello es el problema de visibilidad en la ciudad de Shanghai, China, donde se halló una alta correlación entre la disminución de visibilidad con el MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> (Huang y col., 2009). Así también, es posible encontrar vistas turísticas afectadas por la baja visibilidad producida por los aerosoles, como la Torre Eiffel en París, la Space Needle en Seattle o parques nacionales, como el Parque Nacional de Glaciares en Canadá (Pauly, 2009).

En general el MP suele clasificarse por la capacidad de ingreso en el aparato respiratorio humano, la cual podría ocasionar un impacto en la salud de las personas. De este modo, partículas con un diámetro aerodinámico menor a 10 µm (MP<sub>10</sub>) se designan como partículas respirables, puesto que tienen fracciones factibles de ser respirables, es decir, que ingresan a los pulmones. En cambio las partículas de un diámetro aerodinámico menor a 2,5 µm (MP<sub>2,5</sub>) son designadas como 100% respirables, ya que pueden ingresar por las vías respiratorias hasta llegar a los alvéolos, generando riesgos de mortalidad y morbilidad para las personas (Donaldson y col., 2001; MacNee y Donaldson, 2000).

La Organización Mundial de la Salud, OMS, estimó que para el 2012 una cantidad de 3,7 millones de personas habían muerto prematuramente a causa de la exposición de MP<sub>10</sub> en todo el mundo (OMS, 2014). Los efectos en la salud más estudiados son problemas respiratorios y cardiovasculares (Dockery, 2009; Donaldson y col., 2001; Pope y col., 2004).

En Santiago de Chile también se han estudiado los efectos del MP en la población humana, tanto los problemas respiratorios y como los cardiovasculares (Ostro y col., 1996; Cifuentes y col., 2011; Barrios y col., 2004; Ilabaca y col., 1999; Román y col., 2004). En un estudio se encontró una mortalidad creciente con la exposición a material particulado,

aunque se evidenció una mayor relación con el MP<sub>2,5</sub> (Ostro y col., 1996). Otro estudio más reciente evaluó la relación entre la exposición del MP<sub>2,5</sub> y los ingresos hospitalarios por infarto, dando como resultado que por cada aumento de las concentraciones de MP<sub>2,5</sub> en 10  $\mu\text{g m}^{-3}$ , el riesgo de ingresos hospitalarios de emergencia por causas cerebrovasculares aumentó en un 1,29% (Leiva y col, 2013)

La contaminación del aire provoca efectos negativos en el ecosistema, un ejemplo de ello son los efectos negativos en la agricultura. La Coalición de Clima y Aire Limpio para Reducir los Contaminantes Climáticos de Vida Corta (CCAC) indicó que cada año hay una pérdida de 110 millones de toneladas métricas de cosechas de los cuatro principales granos (trigo, maíz, arroz y soya), debido a la contaminación por contaminantes de vida corta (CCAC, 2014). Según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) los 20 países con mayor producción de estos granos alcanzaron, en conjunto, una cantidad de más de 2 mil millones de toneladas métricas en el año 2012. Por lo tanto, la producción de estos granos pudo haber sido afectada aproximadamente en un 5%. En ese mismo año, Chile produjo cerca de 31 millones de toneladas entre el trigo, arroz y maíz, equivaliendo al 1% de la producción de los países anteriores (INE, 2012).

Existen otros estudios que relacionan el MP con efectos negativos sobre los ecosistemas, tales como, reducción de la biodiversidad y la pérdida de bienes y servicios ecosistémicos (Westman, 1997; Daily, 1997). El impacto del MP en los ecosistemas está mediado por procesos de deposición (Grantz y col., 2003) y por la exposición a una concentración determinada de MP, lo que lleva a diferentes respuestas de los componentes del ecosistema.

En Santiago, los efectos negativos del MP a los servicios ambientales también han sido estudiados. Uno de los más notorios es la disminución de visibilidad, la cual se presenta mayoritariamente en períodos de invierno (Trier y Horvath, 1989). Otros efectos, como la deposición del contaminante sobre plantas, han sido estudiados por Agrawal y col., 2003.

## 1.1.2 Composición del Material Particulado

El MP influye en la degradación de la calidad del aire, y su composición proporciona información de los posibles orígenes y potenciales efectos en el ecosistema. La composición química del MP puede variar enormemente en función de su tamaño, características fisicoquímicas y Variabilidad espaciotemporal, presentando un impacto negativo significativo en la salud de las personas. De ahí es que el MP es objeto de interés, debido a su alta complejidad como componente ambiental de la atmósfera.

Se han identificado como principales componentes del MP: el sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), metales pesados, carbón negro (CN) y compuestos orgánicos (Frank, 2006; Molina y Molina, 2003; Toro y col, 2013). El presente estudio se centrará tanto en el  $\text{MP}_{2,5}$  como en uno de estos componentes, el CN.

Entre los factores que determinan la composición del MP en una localidad, es el tipo de emisiones que se generan en el área, ya que cada emisión genera diferentes contaminantes. Así es como los componentes del MP son atribuidos a diferentes actividades antropogénicas, por ejemplo: los sulfatos a la generación de energía e instalaciones industriales; los nitratos a los autos, camiones y generación de energía; el carbono orgánico y carbono negro a las emisiones de vehículos livianos y pesados, incendios forestales, quema de residuos y fuentes naturales. Los metales pesados se asocian a operaciones metalúrgicas (OMS, 2014), por mencionar algunas.

Para ser específicos en las fuentes del CN, la CCAC nombró las siguientes fuentes:

- i) calefacción y cocina residencial de biocombustible;
- ii) calefacción y cocina residencial de carbón;
- iii) motores diésel en carretera;
- iv) motores diésel fuera de la carretera;
- v) carbón industrial y fábricas de ladrillos;
- vi) quema abierta de campos de agricultura.

Por otra parte, según la USEPA, en Latino América la proporción de las fuentes de CN son: 19% para fuentes móviles, 35% para la quema de biomasa, 25% de emisiones residenciales y un 19% de la industria (USEPA, 2010).

Otros factores determinantes de la composición del MP son las condiciones climáticas y geográficas que existen en cada localidad. Un ejemplo para entender cómo estos tres factores influyen en la composición del MP es el caso de la ciudad de México. En esta megaciudad las emisiones están relacionadas con sus más de 3 millones de vehículos y las más de 5 mil industrias. Estas fuentes generan más de 28 toneladas métricas por día de MP<sub>10</sub>, que incluyen 17 ton/día de MP<sub>2,5</sub> y 2400 ton/día de posibles precursores de partículas, como el SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y compuestos orgánicos (SMADF, 2002). Las características geográficas de la ciudad de México son estar a una gran altura (2240 m.s.n.m.), lo que provoca que la ciudad reciba una radiación solar intensa promoviendo la formación de contaminantes fotoquímicos (SMADF, 2002), y encontrarse rodeada por montañas al sur, oeste y este. Con todo lo anterior un estudio indicó que los porcentajes del MP<sub>2,5</sub> en la ciudad de México son: un 60% de compuestos con alto contenido de carbono (orgánicos= 54,6% y carbono negro=11,0%), seguido por sulfato (10,3%), nitrato (10%), polvo suspendido (6,9%) y clorados (0,8%).

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) caracterizó el MP<sub>2,5</sub> en diferentes localidades del país norteamericano, obteniendo distintos porcentajes de sulfatos, nitratos, compuestos con alto contenido de carbono y cristales. El resultado más notorio es que el lado Este del país tiene un alto porcentaje de sulfatos y de compuestos de carbono, lo cual se asocia al tráfico vehicular y emisiones de industrias, así como también a que tiene más humedad relativa que el lado Oeste.

Por último, en Santiago de Chile los porcentajes de composición del MP<sub>2,5</sub> determinados por estudios de Didyk y col (2000) y Morales (2006) dieron: i) el 60% del MP<sub>2,5</sub> proviene de componentes inorgánicos como el amonio (8-17%), sulfato (6-17%), nitrato (15-28%) y cloruro (2-5%); ii) los porcentajes del carbono orgánico y carbono

negro están entre 15 y 20%; iii) del polvo natural y otros elementos su aparición es por debajo de un 5% (Didyk y col., 2000; Morales, 2006).

### **1.1.3 Relación CN/MP<sub>2,5</sub>**

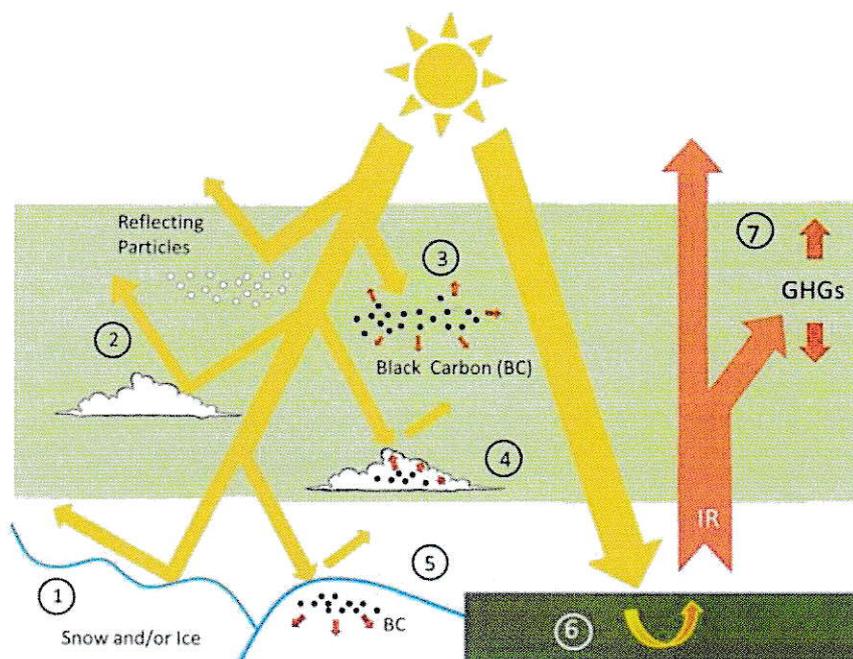
El CN se define como un poderoso forzador climático y un peligroso contaminante del aire. Tiene un alto porcentaje de contenido de carbono con una combinación única de propiedades físicas, tales como:

- i) intensa absorción de luz visible,
- ii) muy estable térmicamente logrando mantener su forma hasta altas temperaturas,
- iii) existencia como agregado de pequeñas esferas y
- iv) su insolubilidad en agua y en disolventes orgánicos comunes (Petzold y col., 2013; Bond y col., 2013).

La relación entre el CN y el MP<sub>2,5</sub> depende de los mismos factores descritos en la sección 1.1.2. Mientras existan mayores fuentes de CN en la zona, el porcentaje de la relación será mayor.

La importancia de investigar esta relación es por las características fisicoquímicas del CN. Según la USEPA, las características del CN podrían desencadenar diferentes tipos de daño al medio ambiente (Figura 1). El primero sería cuando el carbono negro está suspendido en la atmósfera; al llegar la radiación solar el carbono negro absorbe una parte de estos, provocando un calentamiento en la atmósfera (Wang y col., 2013). El segundo caso se observaría cuando las nubes contienen carbono negro. Nuevamente este absorbe parte de la radiación solar, disminuyendo la radiación solar reflejada por la nube, y da resultado a un aumento de la temperatura de esta, afectando en el tiempo de vida de las nubes en la atmósfera y la reducción de su probabilidad de precipitar (Mahajan y col., 2013).

Por último, existe el caso cuando el carbono negro se deposita en la nieve y/o el hielo, absorbiendo parte de la luz solar que debería ser reflejada, dando una mayor tasa de derretimiento del cuerpo helado (Yasunari y col., 2015).



**Figura 1** Efectos del carbono negro en el clima y una comparación con los gases de efecto invernadero. (Fuente: USEPA, 2010)

A los efectos del CN en el ecosistema es posible agregar el daño en la salud humana y en el ambiente vegetal (CCAC, 2014). El CN ha sido asociado a problemas respiratorios de niños, problemas cardiovasculares, como arritmias y disminución en la reactividad vascular medida por flujo (Kim y col., 2005; Gold y col., 2005; Peters y col., 2000; Jansen y col., 2005; O’Niell y col., 2005). Por otra parte el CN al depositarse sobre las hojas de las plantas disminuye o atenúa la luz solar que le llega, reduciendo la eficiencia de la fotosíntesis (CCAC, 2014).

Las variaciones del CN en el  $MP_{2.5}$  dependiendo del clima pueden ser ejemplificadas con el cambio la humedad relativa y el vector del viento. Un estudio de Lippi y Kumar (2013) en el Norte de India dentro del período invernal, indicó que a

medida que aumenta la humedad relativa las concentraciones del CN también lo hacen. En cambio, el vector viento produce el transporte del CN, así es como, en una ciudad de Korea se relacionó la variabilidad del CN con emisiones locales y con un transporte de largo alcance de masas de aire desde China (Park y Lee, 2015).

En Santiago de Chile, se han realizado diferentes estudios que miden el  $MP_{2,5}$  y el CN. Artaxo y col (1999) describió la composición del en Las Condes en un período invernal y obtuvo para el  $MP_{2,5}$  y el CN promedios iguales a  $35,7 \mu\text{g m}^{-3}$  y  $3,5 \mu\text{g m}^{-3}$ , respectivamente. Toro y col (2013) estudiaron el  $MP_{2,5}$  y los compuestos con carbono, carbono orgánico y carbono negro, en tres sitios de la ciudad por 6 años. En la estación de Las Condes se obtuvo un porcentaje anual de CN en el  $MP_{2,5}$  igual a 7,4%, siendo las concentraciones de y CN iguales a  $27 \pm 17 \mu\text{g m}^{-3}$  y  $2,0 \pm 1,8 \mu\text{g m}^{-3}$ , respectivamente.

## **1.2 Transporte atmosférico y otros factores de las concentraciones de contaminantes**

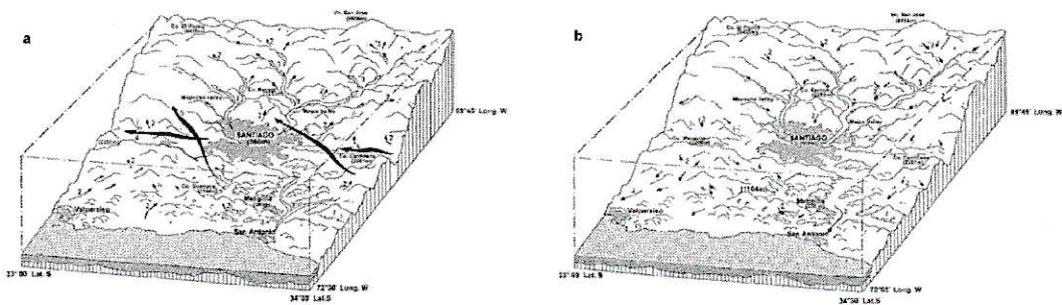
Si bien el transporte de los contaminantes depende fundamentalmente del comportamiento y variabilidad del viento, existen otros factores que afectan los niveles de concentración de ellos en la circulación atmosférica. Estos factores serían:

- i) la cantidad de emisiones;
- ii) las características fisicoquímicas de los contaminantes;
- iii) otros factores meteorológicos del sitio (temperatura y humedad relativa);
- iv) y las características geográficas de la zona de estudio (Brasseur y col., 2003; Morales, 2006).

Las características fisicoquímicas relevantes de los contaminantes particulados son las que afectan su reactividad y movilidad, y, por lo tanto, sus concentraciones, siendo: su textura, estructura, espacio poroso y porcentaje de materia orgánica (Morales, 2006). Según estudios previos el  $MP_{2,5}$  y el CN tienen un tiempo de vida de algunos días, por lo que sus escala de variación espacial se encuentran en el rango local y regional (CCAC, 2014; Pawar y col., 2015)

Por otra parte, los factores meteorológicos, en conjunto con las características geográficas de la zona de estudio, pueden afectar fuertemente en el transporte y la dispersión de los contaminantes. Así es como en ciudades industrializadas que se encuentran dentro de un valle geográfico, como Santiago de Chile, en períodos invernales disminuye la ventilación y la altura de la capa de mezcla, reduciendo la dispersión vertical de los contaminantes y dificultando el transporte de las masas de aire contaminado (Morales, 2006; Muñoz y Undurraga, 2010).

Un estudio de Romero y col (1999) estudió la topoclimatización y la geografía ambiental de la cuenca de Santiago, relacionando la dispersión de los contaminantes con los vientos locales. En la Figura 2 se muestran los sistemas diurnos de los vientos en el verano, donde en el día los vientos se dirigen al Valle del Mapocho (a) y en la noche los vientos descienden desde el Este al Oeste (b). Por esta razón un transporte atmosférico de los contaminantes de Santiago a un sector Cordillerano del Valle del Mapocho, como Farellones, sería un estudio que ayudaría en la comprensión de la circulación de los contaminantes en la cuenca de Santiago.



**Figura 2** Sistemas diurnos de la circulación de los vientos en el verano de la cuenca de Santiago, en el día (a) y la noche (b). (Fuente: Romero y col, 1999)

### 1.2.1 Santiago de Chile como caso de estudio

Santiago es una ciudad ubicada en el valle principal de la zona central, con las coordenadas geográficas de 33,5° S y 70,6° O. En el año 1996 la Región Metropolitana fue declarada, por el Gobierno de Chile, zona saturada para cuatro contaminantes (CONAMA, 1996): monóxido de carbono, ozono, partículas totales en suspensión (PTS) y material particulado respirable (MP<sub>10</sub>). Además, la ciudad de Santiago cuenta desde 1988 con una red oficial de monitoreo automático de calidad de aire, la Red MACAM, que inició con cinco estaciones, y que en el año 1997 fue renovada y ampliada a ocho estaciones, denominándose desde entonces Red MACAM-2.

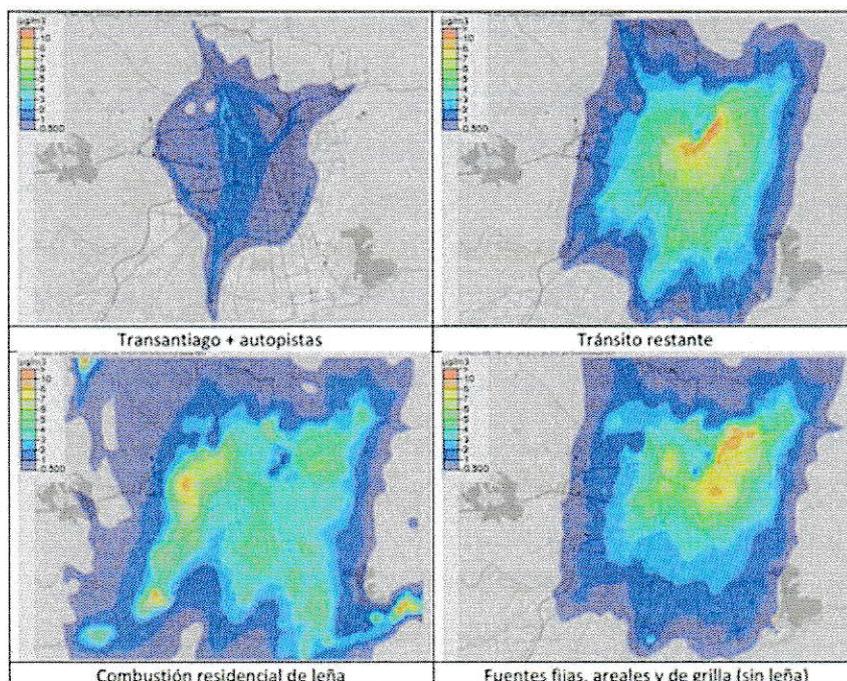
Aunque se han realizado iniciativas políticas para disminuir la contaminación por MP<sub>2,5</sub>, aún Santiago sigue presentando altos niveles que sobrepasan la normal nacional, 50 µg m<sup>-3</sup> por año. Esto queda demostrado por un estudio realizado por Toro y col (2014) que analizó las mediciones de MP desde el año 2000 al 2012, el cual concluyó que las concentraciones de MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> han disminuido en el tiempo, pero que aún están sobre los estándares de calidad de aire nacional, y mucho más de los mundiales. En lo que respecta al CN en Chile, no está normado pero como es parte del MP<sub>2,5</sub> se supone que también ha reducido sus concentraciones, suposición que se apoya por estudios de la USEPA (USEPA, 2010).

En lo que respecta a las fuentes de emisión en Santiago, el inventario de emisiones de la región Metropolitana, actualizado el año 2013, indica que las mayores emisiones de MP son el transporte, tanto para el MP<sub>10</sub> como para el MP<sub>2,5</sub>, representado este un porcentaje de emisiones igual a 44% para el MP<sub>10</sub> y a 41% para el MP<sub>2,5</sub>, ver Tabla 1.

**Tabla 1** Resumen de los resultados de las emisiones clasificadas por sector (USACH, 2013)

Sector	Emisiones de Contaminantes (ton/año)	
	MP <sub>10</sub>	MP <sub>2,5</sub>
Industria	742	4.921
Residenciales	2.186	2.077
Agrícolas	205	183
Transporte	2.877	2.398
Construcción	568	534
<b>Total</b>	<b>6.578</b>	<b>5.854</b>

El mismo inventario modeló las emisiones de las fuentes de MP<sub>2,5</sub> en Santiago (Figura 3). Estas imágenes aportan información valiosa sobre las altas concentraciones de MP<sub>2,5</sub> y de CN, siendo las zonas central, oeste y noreste de la ciudad las con mayores contribuciones a las emisiones totales.



**Figura 3** Contribuciones de MP<sub>2,5</sub> promedio anual para el 2012 por los diferentes sectores tomados en el inventario (USACH, 2013).

De manera general el estudio de Ihl (2010) caracterizó las condiciones meteorológicas de Santiago en verano e invierno:

- i) En verano existen altas presiones, buen tiempo, cielo despejado, intensa radiación solar UV, altas temperaturas, gran estabilidad del aire y vientos ascendentes;
- ii) En invierno se presentan altas presiones, situaciones pre y postfrontal, bajas temperaturas y niebla, gran estabilidad del aire, capa de inversión térmica y mala ventilación a nivel de cuenca.

Las diferencias de las condiciones meteorológicas entre los dos períodos del año en Santiago estarían fuertemente relacionadas al transporte atmosférico a estudiar, por lo que las mediciones de ellas serán esenciales.

Para analizar el transporte atmosférico de  $MP_{2,5}$  y CN desde Santiago a Farellones es necesario tener un ejemplo de transporte atmosférico en el mismo sitio. El estudio de Schmitz (2005) realizó una modelación del CO para el mes de enero del año 2002. Los resultados dieron que en las horas del día la mayor cantidad de los contaminantes son transportados hacia el noreste de la ciudad, dentro del Valle del Mapocho y son ventilados fuera de la cuenca pendiente arriba de la Cordillera de los Andes.

El sitio en donde finaliza el transporte atmosférico propuesto, Farellones, queda a unos aproximados 3000 m.s.n.m y en la zona se encuentran el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca y grandes áreas de glaciares a mayores alturas. Por lo tanto, la llegada de contaminantes a Farellones podría crear una inestabilidad en los ciclos biogeoquímicos de su entorno, disminuyendo la calidad del ecosistema.

### **1.3 Hipótesis**

La circulación atmosférica regional de Santiago determina un transporte atmosférico de  $MP_{2,5}$  y el CN hacia un sector cordillerano, Farellones, siendo un sector con servicios ambientales susceptibles a la contaminación atmosférica.

### **1.4 Objetivo General**

Evaluar el transporte atmosférico del  $MP_{2,5}$  y el CN desde Santiago al sector Cordillerano, Farellones, a través del estudio de las concentraciones y los parámetros meteorológicos registrados (velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa) entre dos sitios específicos de cada sector, Las Condes y La Parva, respectivamente.

#### **1.4.1 Objetivos Específicos**

- Identificar las posibles fuentes de emisión cercanas a los puntos de muestreo para reconocer las fuentes de los contaminantes.
- Instalar equipos, asegurando la electricidad continua y la inexistencia de perturbaciones en las mediciones.
- Evaluar la variabilidad temporal (meses, días, día y noche) de las concentraciones de  $MP_{2,5}$ , CN y de las variables meteorológicas (temperatura ambiental, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) durante el período de Diciembre del año 2014 hasta Agosto del año 2015.
- Establecer relaciones entre parámetros meteorológicos y  $MP_{2,5}$  y/o carbono negro, que podrían explicar el transporte de Santiago al sector cordillerano, Farellones.
- Establecer el posible impacto de la contaminación atmosférica transportada de Santiago a La Parva.

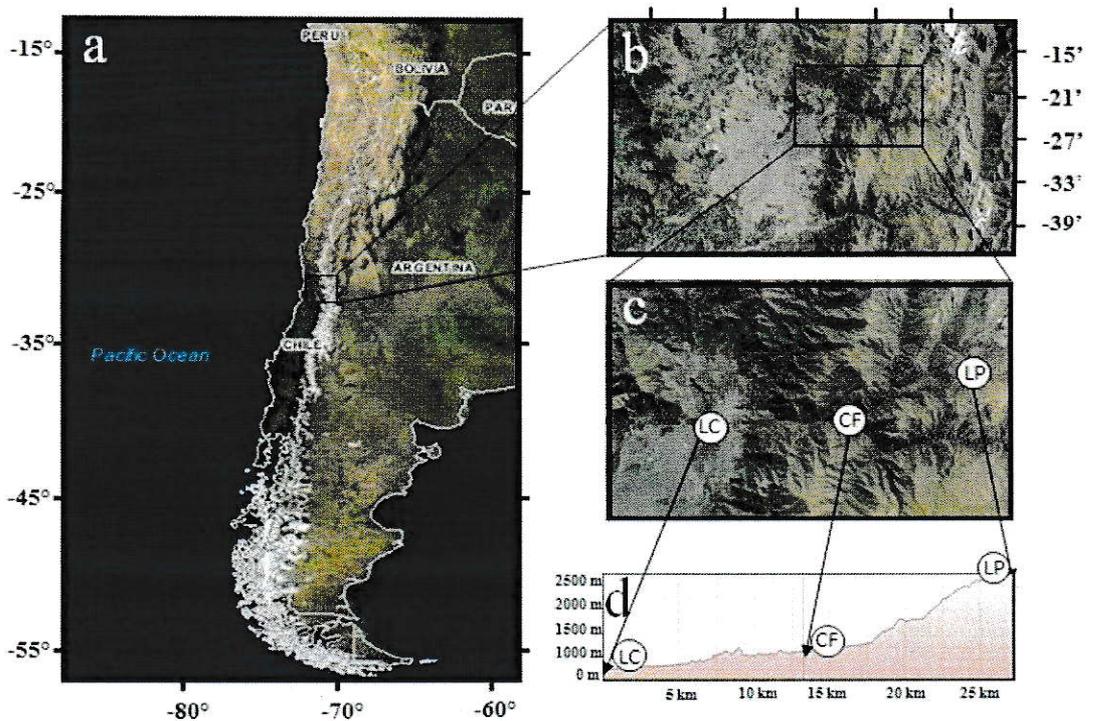


## II MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Descripción de la zona de estudio

En la Región Metropolitana de Chile se encuentra la ciudad de Santiago (33,5° S y 70,6° O). La población de esta ciudad ha alcanzado los 6 millones en el 2010, representando al 40% de la población total de Chile. Dentro de la ciudad es posible encontrar alrededor de 1,5 millones de vehículos a motor, siendo estos el 42% de la flota de vehículos en todo Chile, además de tener el 70% de la actividad industrial del país (INE, 2013). Como consecuencia la Región Metropolitana posee una baja calidad del aire, siendo declarada zona saturada por MP<sub>2,5</sub> en el 2014 como concentración de 24 horas, por el Decreto N° 67/2014 del Ministerio del Medio Ambiente.

En la Figura 4 muestra la zona de estudio, en donde se muestra a Santiago ubicado en el centro de Chile (a), seguido por la vista del valle de Santiago (b) que tiene una elevación promedio de 520 m.s.n.m y que está rodeado por la Cordillera de Los Andes y la Cordillera de la Costa, al este y oeste respectivamente. El valle de Santiago pertenece al conocido valle del Maipo, donde los ríos Maipo y Mapocho recorren la ciudad. En la cuenca Alta del río Mapocho se encuentra el distrito de Farellones (33,2° S y 70,19° O). La población del distrito casi alcanza las 2 mil personas de acuerdo al CENSO del año 2002. El rango de altitud está entre 1.300 y 5.340 m.s.n.m, con altos cerros como La Paloma y El Plomo. Es posible encontrar áreas con vegetación endémica como el Santuario Yerba Loca y glaciares, tales como La Paloma, Olivares Alfa y la Esmeralda.



**Figura 4** Imágenes satelitales de la región estudiada, desde una visión país (a), siguiendo por una regional (b), hasta una visión de las estaciones monitoreadas entre Santiago y Farellones (c), con su perfil de inclinación (d). LC: Las Condes; CF: Camino a Farellones; y LP: La Parva. (Fuente: Google Earth).

El clima en la Región Metropolitana es Mediterráneo, rangos de temperaturas entre  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , siendo el promedio igual a  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$  (DMC, 2013). Los vientos están regidos por una brisa valle-montaña, con vientos mayoritariamente bajos provenientes del suroeste que no alcanzan los  $2,0\text{ m/s}$  en otoño e invierno (DMC, 2013). Además las condiciones meteorológicas se ven alteradas por el anticiclón subtropical del océano Pacífico, que provoca una inversión térmica de subsidencia, que hace que la altura de la capa de mezcla varíe entre los 400 metros en los meses de otoño-invierno, y los 1.000 m. en los meses de primavera-verano. Lo anterior determina una baja ventilación en Santiago produciendo episodios críticos de contaminación del aire (Ulriksen, 2004).

En Farellones el clima también tiene una influencia mediterránea con menores temperaturas, siendo el rango de temperatura mensual durante primavera-verano desde 7 °C en Abril a 12 °C en Febrero a 2.600 m. de altitud (Cavieres y Arroyo, 1999). El período sin nieves es entre mediados de Octubre y mediados de Mayo (Di Castri y Hajeck, 1976), con una precipitación total anual media de 445 mm. a 2.500 m. de altitud (Santibáñez y Uribe, 1993).

## 2.2 Sitios de Monitoreo

En la Figura 4 (c) también se muestra la vista de los tres sitios de monitoreo escogidos, que se encuentran en puntos consecutivos de la trayectoria desde Santiago a Farellones: en el extremo noreste de Santiago aproximadamente a unos 11 km del centro, la comuna de Las Condes (LC); en el kilómetro 11 ½ de la ruta del Camino a Farellones (CF), ruta que comienza en el extremo de la comuna de Las Condes; y en una localidad de Farellones, La Parva (LP), que queda aproximadamente a 27 km de Las Condes. En la Tabla 2 se caracterizan las tres estaciones, con sus coordenadas geográficas, sus alturas y los parámetros medidos en cada una. Por otra parte, en la Figura 4 (d) se muestra el perfil de inclinación del trayecto desde Santiago a Farellones, donde es posible ubicar a las estaciones en el principio, mitad y final del trayecto.

Las estaciones de monitoreo cumplen las siguientes características:

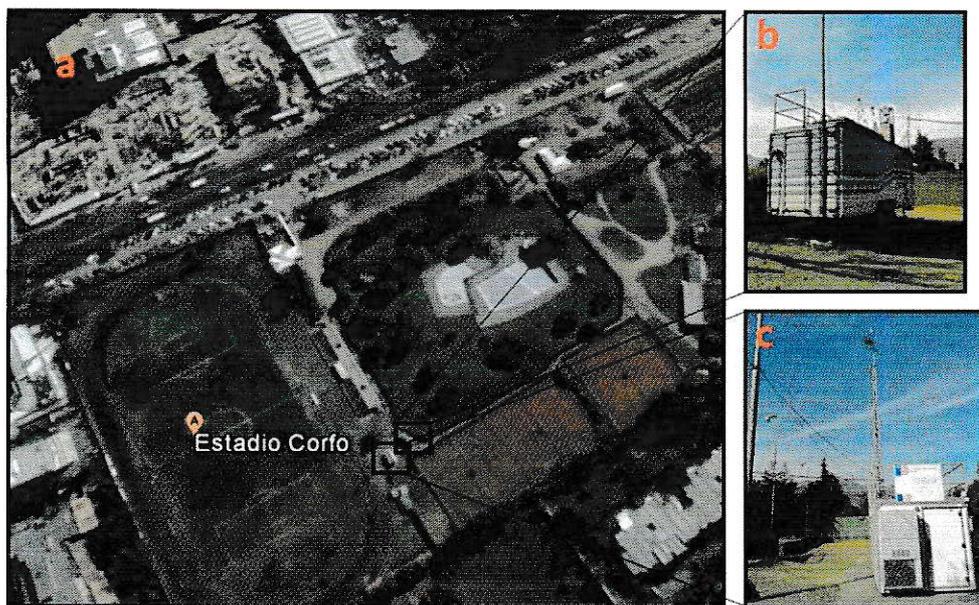
- i) localización que permite la captura de las variables medidas de manera representativa, con la seguridad adecuada para mantener los equipos;
- ii) instrumentación para muestrear el o los contaminantes medidos, o los parámetros meteorológicos (PM);
- iii) alimentación eléctrica que permite la toma de muestra durante el período de medición.

**Tabla 2** Estaciones de monitoreo utilizadas durante el estudio en la zona central de Chile.

Estación	Código	Latitud (S)	Longitud (O)	Altitud (m)	Parámetros Monitoreados
Las Condes	LC	33°22'35.50"	70°31'24.35"	795	MP <sub>2,5</sub> y PM
Camino a Farellones	CF	33°22'10.24"	70°23'52.86"	1181	CN
La Parva	LP	33°19'58.43"	70°17'38.33"	2700	MP <sub>2,5</sub> , CN y PM

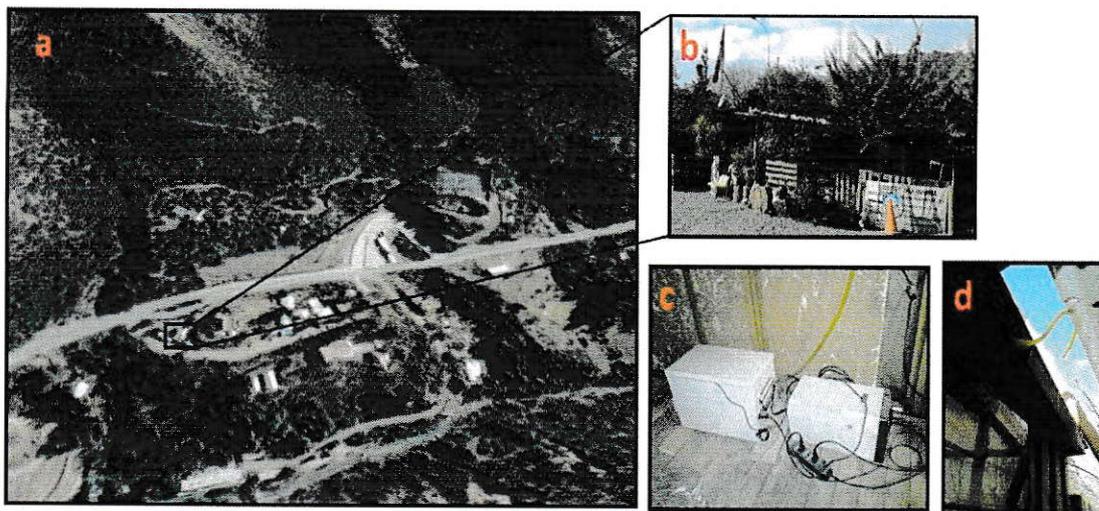
A continuación se realiza una descripción detallada de los sitios de monitoreo.

La Figura 5 muestra la estación de Las Condes (LC), que representa las emisiones santiaguinas, con los contaminantes emitidos o dispersados en la zona noreste de la ciudad, es decir es una estación de tipo urbana. Esta estación es parte de la Red MACAM del Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile y está dentro del Estadio CORFO. Como la estación se encuentra dentro de un estadio, las emisiones locales se restringen por las pocas actividades emisoras que se realizan dentro, como levantamiento de polvo o combustión de equipos para cortar el pasto, y por el tránsito vehicular cercano. El tránsito vehicular depende mayoritariamente de la Av. Las Condes, donde transitan vehículos tanto particulares como públicos, así como los buses del Transantiago. Las horas de mayor tráfico se darían en dos horas, en la mañana cerca de las 8 horas y en la tarde cerca de las 19 horas.



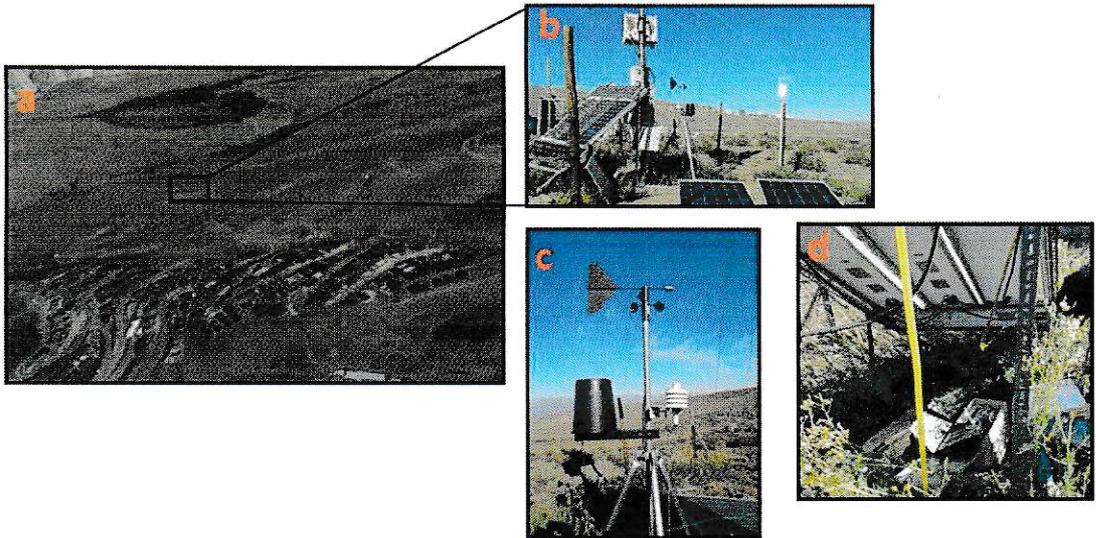
**Figura 5** Imágenes de la estación de monitoreo Las Condes: (a) imagen satelital del entorno (Google Earth); (b) y (c) vista norte de las estaciones de monitoreo de los parámetros de calidad de aire,  $MP_{2,5}$ , y de los parámetros meteorológicos en altura, respectivamente (Fuente Propia).

En la Figura 6 se muestra la vista norte de la estación Camino a Farellones (CF), que se ubicó en un terreno de aproximadamente  $1000 \text{ m}^2$ , “Doña Juanita”, que se encuentra en el kilómetro  $11 \frac{1}{2}$  del Camino a Farellones. La estación se identifica como periurbana al encontrarse aledaña a Santiago. En el Camino a Farellones las fuentes locales serían las cocinas y quemas de biocombustible de las viviendas alrededor, y el tránsito vehicular en el Camino a Farellones. El tránsito vehicular es de característica turista y minera: hay movimiento vehicular por turistas que suben a los centros de esquí o al Santuario Yerba Loca, como también hay movimiento por los trabajadores de las minas cercanas en camionetas. Las horas de mayor circulación vehicular, según un censo del 2002, serían las 10 y las 16 horas, siendo las camionetas el vehículo más frecuente (INE, 2002).



**Figura 6** Imágenes de la estación de monitoreo Camino a Farellones: (a) imagen satelital del entorno (Google Earth); (b) vista norte del Kiosko Juanita (Fuente propia); (c) y (d) instalación del simca y de una UPS con la salida de manguera (Fuente propia).

La visión norte de la estación La Parva (LP) se muestra en la Figura 7. Ella está ubicada dentro del centro de esquí La Parva, al lado de la comunidad del mismo nombre. La propiedad del terreno es del Departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. La estación se identifica como rural y de gran altura, estando a cierta distancia de la comunidad de La Parva y en invierno está dentro de las pistas de esquí. Los instrumentos obtenían la energía de los paneles solares instalados en el mismo sitio y en invierno se conectaron a una de las casetas del centro de esquí La Parva.



**Figura 7** Imágenes de la estación de monitoreo La Parva: (a) imagen satelital del entorno (Google Earth); (b) vista norte de la estación cercada con los paneles solares como fuente de energía (Fuente Propia); (c) y (d) son las instalaciones para los instrumentos que miden los parámetros meteorológicos y contaminantes, respectivamente (Fuente propia).

### **2.3 Mediciones de las concentraciones de los contaminantes y de los parámetros meteorológicos**

El tiempo total de campaña fue desde el 4 de Diciembre del 2014 al 13 de Agosto del 2015. El  $MP_{2,5}$  se monitoreo en las estaciones de LC y LP, utilizando un Monitor de Atenuación Beta (BAM 1020, Met One Instruments, Inc., Washington, USA) y un Monitor de Aerosoles DustTrack (Modelo 5820, TSI, Saint Paul, Minesota, Estados Unidos) respectivamente. Los parámetros instrumentales de los equipos son: límite de detección horaria de  $4,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $0,001 \text{ mg}/\text{m}^3$  con una resolución de  $0,24 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 1 rango de  $1 \text{ mg}$ , con un ciclo de medición de 1 hora y de  $0,001 \text{ mg}/\text{m}^3$ , midiendo los datos cada 5 min para el BAM y el DustTrack respectivamente. El CN se midió en CF y LP mediante equipos diseñados y fabricados en la Universidad de Santiago de Chile, llamados Sistema de Medición del Coeficiente de Absorción, SIMCA (Gramsch y col., 2000). Este equipo se calibró comparándolo con un Analizador de Aerosol OC-EC (Sunset Laboratory

Inc., 10180 SW Nimbus Avenue, Suite J5 Tigard, OR 97223-4341), dando un límite de detección de  $0,014 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y una resolución de  $0,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con un ciclo de medición de 15 min.

Los parámetros meteorológicos (velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa) se midieron en LC y LP, utilizando distintas marcas de equipo. En LC se ocuparon el sensor de marca MetOne para velocidad del viento modelo 10C con límite de detección y resolución igual a  $0,07 \text{ m/s}$  y  $<0,1 \text{ m/s}$ , respectivamente. También el sensor de dirección del viento modelo 20C con límite de detección y resolución igual a  $\pm 3^\circ$  y  $<0,1^\circ$ , respectivamente. Por último el sensor de temperatura y humedad relativa modelo 0831E (Met One Instruments, Inc., Washington, USA), teniendo los límites de detección de  $0\%$  y  $-50^\circ\text{C}$  y las resoluciones de  $\pm 2,0\%$  y  $\pm 0,10^\circ\text{C}$ , respectivamente.

Por otra parte, en LP se ocuparon sensores de marca NovaLynx Corporation, el sensor de velocidad y dirección del viento modelo 200-WS-02 con los límites de detección iguales a  $0,8 \text{ mph}$  y  $0^\circ$ , respectivamente y las resoluciones de  $0,5 \text{ mph}$  y  $<1^\circ$ , respectivamente. También el sensor de temperatura y humedad relativa modelo 110-WS-16TH con los límites de detección iguales a  $-40^\circ\text{C}$  y  $0\%$ , respectivamente y las resoluciones de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  y  $\pm 3\%$ , respectivamente (NovaLynx Corporation, Grace Valley, USA).

## **2.4 Análisis de datos**

Los programas para el análisis de datos utilizados son: Microsoft Excel 2013 (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA) para el orden de los datos y realizar los promedios diarios y horarios de los mismos; y el programa R Proyect (R Development Core Team, 2012) para realizar los análisis estadísticos entre los promedios diarios y horarios de cada estación, y gráficos que representaran la variabilidad de los datos de concentración de los contaminantes y de los parámetros meteorológicos.

### **2.4.1 Análisis de series temporales**

Para caracterizar la variabilidad de las mediciones de los contaminantes o variables meteorológicas se emplea un análisis de series de tiempo (Morales y Leiva, 2005; Ancelet y col, 2014). En el análisis de series temporales es posible evaluar una secuencia de valores o eventos que cambian con el tiempo, con los datos dentro del mismo intervalo de tiempo. De esta manera se evalúan datos anómalos, analizan tendencias, observan la variabilidad diaria y mensual, además de analizar las relaciones entre las variables.

Estadísticamente se utilizó el análisis de varianza de las medias, ANOVA, que es un modelo que contrasta dos o más medias, las cuales son independientes entre sí y siguen una Variabilidad normal. Este test da la información de si todas las medias comparadas son iguales o que hay al menos una distinta, o sea una hipótesis nula ( $H_0$ ) o una hipótesis de asociación  $H_1$ , respectivamente. El ANOVA es el cociente entre la variabilidad entre grupos, o sea la media de cada grupo con la media total, por la variabilidad intra-grupos. Cuando el análisis tiene un intervalo de confianza igual al 95% el nivel de significancia crítico ( $\alpha$ ) es igual a 0,05, por lo tanto si el resultado del ANOVA da un valor de significancia ( $p$ ) menor a 0,05 la hipótesis nula se rechaza, significando que hay al menos un grupo diferente a los demás.

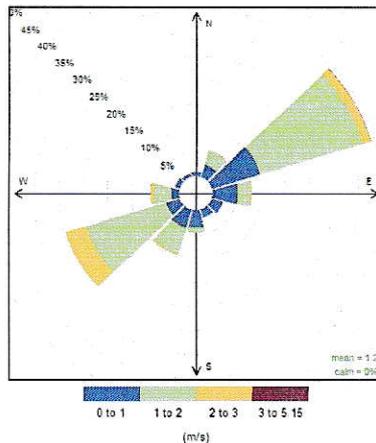
Como el ANOVA no entrega la información de cuál o cuáles grupos son los diferentes se realiza el test de Bonferroni. Este test es un multitest t que elimina el error de tipo I, el cual se origina cuando se aplican múltiples test t con el mismo intervalo de

confianza. La manera de eliminar el error de tipo I es calculando un nuevo nivel de significancia ( $\alpha'$ ), que sería el cociente entre el nivel de significancia anterior (0,05) y el número total de pares de dos que se pueden realizar con un cierto número de grupos (m), ecuación 1.

$$\alpha' = \frac{\alpha}{m} \quad \text{Ecuación 1.}$$

En los valores p obtenidos por el programa R Project no es necesario calcular  $\alpha'$ , ya que se ajusta automáticamente un valor de 0,05. Por lo tanto cuando el test de un resultado p menor a 0,05 se rechaza la hipótesis nula, significando que los grupos comparados son significativamente distintos.

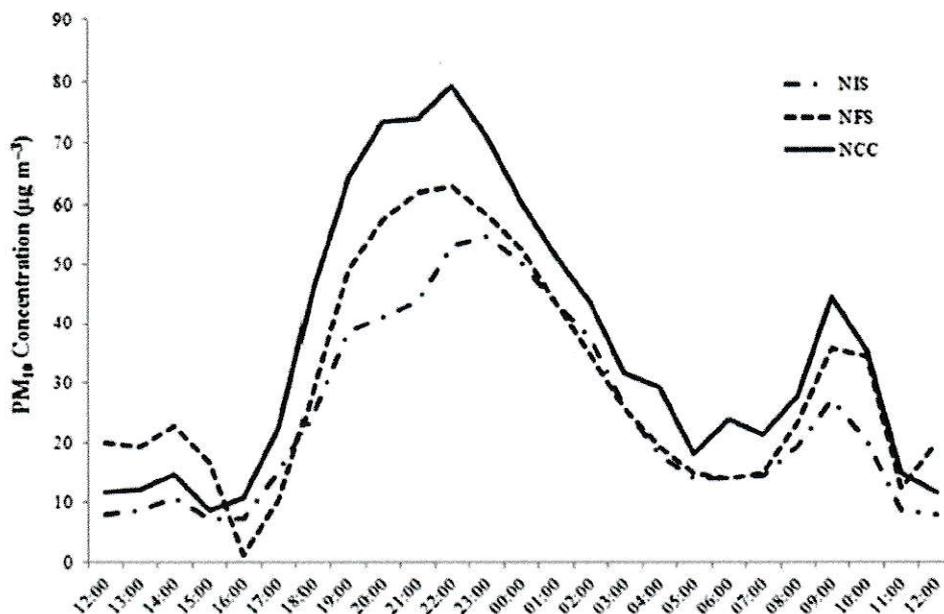
La dirección del viento es la única variable a la que no se puede describir con un promedio de sus valores, por lo que se analiza su comportamiento temporal a través de rosas de viento. Las rosas de viento representan la frecuencia de ciertos rangos de direcciones del viento y de ciertos rangos la velocidad del viento. En la Figura 8 se ejemplifica una rosa de los vientos realizada por el programa R Project, se observan dos direcciones de vientos predominantes, del noreste y del suroeste, ya que tienen los mayores porcentajes de frecuencia (34% y 25%). Además se observa que las velocidades de viento con mayor frecuencia están entre 1 y 2 m/s, así como también se observa que las velocidades de viento más altas se presentan mayoritariamente en las direcciones predominantes de la rosa.



**Figura 8** Rosa de vientos realizada por R Project.

Para confirmar un transporte de contaminantes entre los sitios de muestreo deberán observarse perfiles diarios similares, un decrecimiento de concentraciones parecido y una disminución de concentraciones a medida que se aleja de la fuente de emisión principal. Estas tres condiciones fueron observadas por un estudio de Ancelet y col (2014) que midieron  $MP_{10}$  en tres sitios de una ciudad de Nueva Zelanda, Nelson, durante el invierno.

En la Figura 9 se observan los perfiles diarios de las tres estaciones, donde tienen un comportamiento diurno y un decrecimiento de las concentraciones similares. Además el sitio con la concentración más alta en el pick es el que está más cerca de las fuentes de emisión (NCC), y en los otros dos sitios las concentraciones son menores. Por lo tanto se aprecia el efecto de la dispersión de los contaminantes entre el sitio más cercano a las fuentes de emisión y los sitios más lejanos (NIS y NIF).



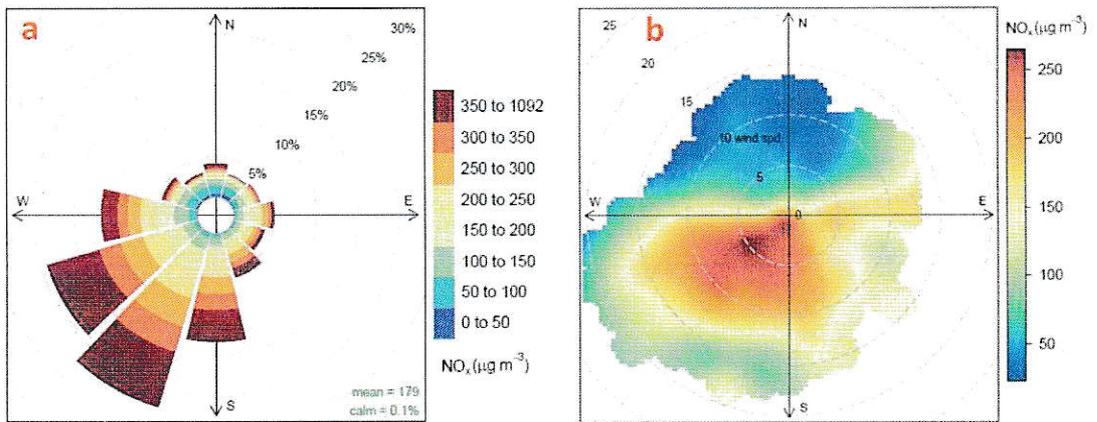
**Figura 9** Promedio de concentraciones horarias de  $MP_{10}$  en la Escuela Intermedia Nelson (NIS), Consejo de la Ciudad de Nelson (NCC) y en la estación de bomberos de la ciudad de Nelson (NFS).

#### 2.4.2 Análisis de la relación entre los parámetros contaminantes y meteorológicos

Para evaluar la relación del  $MP_{2,5}$  y del CN con los parámetros meteorológicos (velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa) se realizan rosas de contaminantes y gráficas polares (Carslaw y Ropkins, 2011). La rosa de contaminantes muestra la relación entre las concentraciones de cierto contaminante y la dirección del viento, en cambio, las gráficas polares muestran la relación entre las concentraciones de cierto contaminante y la dirección y velocidad del viento. Al evaluar la relación entre las variables meteorológicas y las concentraciones de los contaminantes se puede encontrar una tendencia del origen de las concentraciones.

En la Figura 10 se presentan unos ejemplos de una rosa de concentraciones y una gráfica polar realizada por el programa R Project. El ejemplo de la rosa de

concentraciones entrega la información de que las concentraciones más elevadas de NO<sub>x</sub> están asociadas a vientos provenientes del cuadrante suroeste. Por otra parte el ejemplo de gráfica polar dice que las concentraciones más altas de NO<sub>x</sub> están asociadas a vientos provenientes del suroeste y con velocidades menores a 20 m/s. Con estas dos gráficas es posible decir que las concentraciones más altas de NO<sub>x</sub> provienen de fuentes al suroeste con una distancia corta y mediana del sitio de monitoreo.



**Figura 10** Ejemplos de una rosa de concentraciones (a) y una gráfica polar (b) para NO<sub>x</sub>.

### 2.4.3 Análisis del tiempo de transporte

El tiempo de transporte atmosférico de Santiago a Farellones se obtiene a través de una correlación entre los perfiles diarios desplazados de los sitios de monitoreo. Al desplazar temporalmente los perfiles diurnos de los contaminantes y realizar una correlación entre las estaciones de monitoreo es posible estimar el tiempo de transporte, siendo este el que corresponde al desplazamiento temporal con la correlación más alta.

En la Figura 11 se expone un ejemplo del procedimiento a realizar, en (a) se muestran dos perfiles diurnos de un CN en dos sitios supuestos. Para calcular el factor de correlación se toman los datos horarios del perfil de ambos sitios y se desplaza en una hora el del sitio lejano a las fuentes (sitio 2). Al desplazar el perfil del sitio 2 hasta por 9 horas y sacar en cada ocasión un factor de correlación es posible observar un gráfico de

los factores de correlación para los tiempos desplazados (b), donde se muestra que a las 5 horas desplazadas hay la más alta correlación, por lo tanto el transporte atmosférico entre los sitios se demora aproximadamente 5 horas.

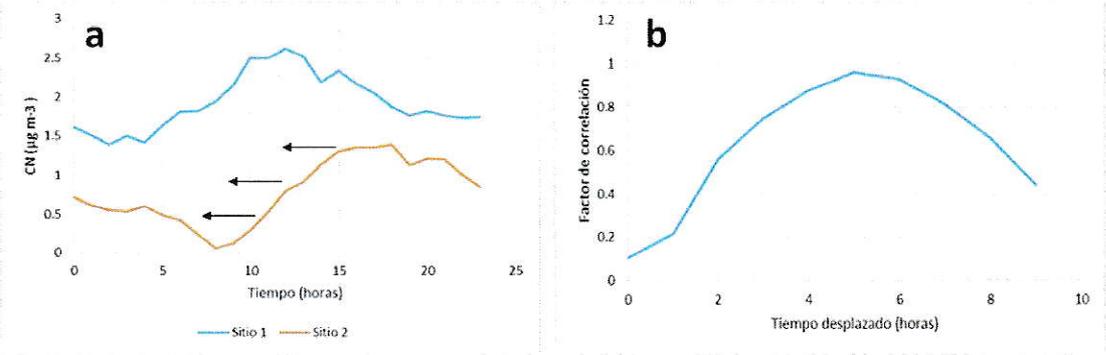


Figura 11 Perfil diario de CN en dos sitios (a) y gráfica de los factores de correlación.

### III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Completitud de la información de monitoreo de contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas

En la Figura 12 se muestra la completitud de las series temporales de los datos de calidad del aire medidos en las diferentes estaciones de monitoreo (MP<sub>2,5</sub> en LC: MP.LC; CN en CF: CN.CF; MP<sub>2,5</sub> en LP: MP.LP; y CN en LP: CN.LP), o sea se muestra la totalidad de los datos medidos. En las series temporales se observan diferencias en la completitud de la información de concentraciones medidas.

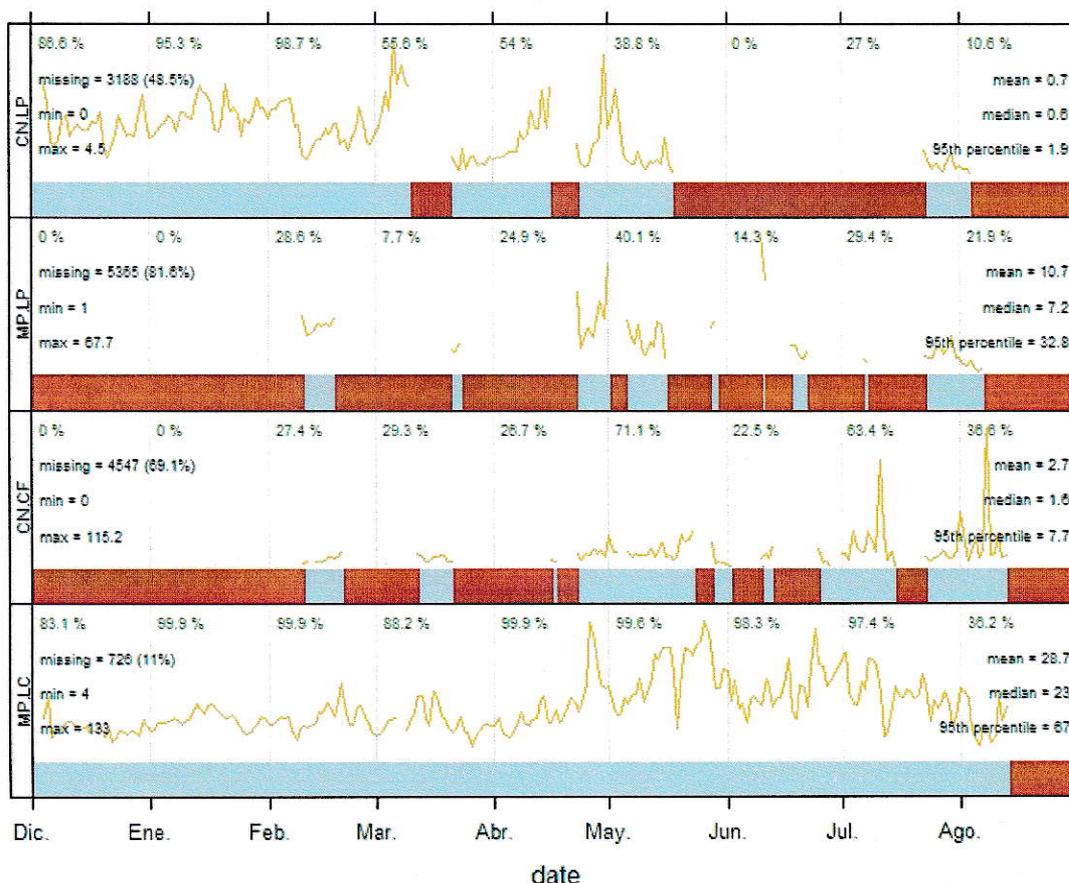
De este modo se observa que la mayor completitud de datos fue obtenida para el MP<sub>2,5</sub> en LC, que partió sus mediciones el 4 de Diciembre del 2014 y terminó el 13 de Agosto del 2015. Este contaminante tiene el menor porcentaje de datos mensuales en Marzo y es igual a un 88,2%. Esto ocurre gracias a la buena mantención de la estación por parte del equipo técnico del Ministerio del Medio Ambiente.

Las mediciones de CN en CF comenzaron el 10 de Febrero y su fin fue el 13 de Agosto del 2015. Este contaminante presenta solo tres meses con un porcentaje de mediciones totales superiores del 50%, Mayo, Julio y Agosto. Por esta razón, la comparación con otras mediciones para los restantes meses se verá comprometida con una alta incertidumbre. Esta baja completitud de datos ocurrió por problemas de electricidad en la estación, que junto a la lejanía de esta, provocaron una baja frecuencia de mantención del equipo.

Las mediciones realizadas en la estación LP son de los datos de MP<sub>2,5</sub> y de CN, con los períodos de tiempo desde el 10 de Febrero al 7 de Agosto del 2015 y desde el 4 de Diciembre del 2014 al 4 de Agosto del 2015, respectivamente. Las mediciones de MP<sub>2,5</sub> no superaron los 10 días consecutivos en todos los meses, teniendo la mayoría de los meses un porcentaje de mediciones totales cercano al 20%. Los meses con mayor



porcentaje de mediciones totales son Abril, Mayo, Julio y Agosto. Esto sucedió porque el equipo presentó diferentes fallas y las visitas de mantención eran pocas por la lejanía de la estación. Por otra parte, las mediciones del CN solo presentaron porcentajes de mediciones totales menores a 50% es los últimos 4 meses de la campaña. En estos meses ocurrieron fallas del equipo por la baja temperatura, lo cual se intentaba mejorar en cada visita de mantención.

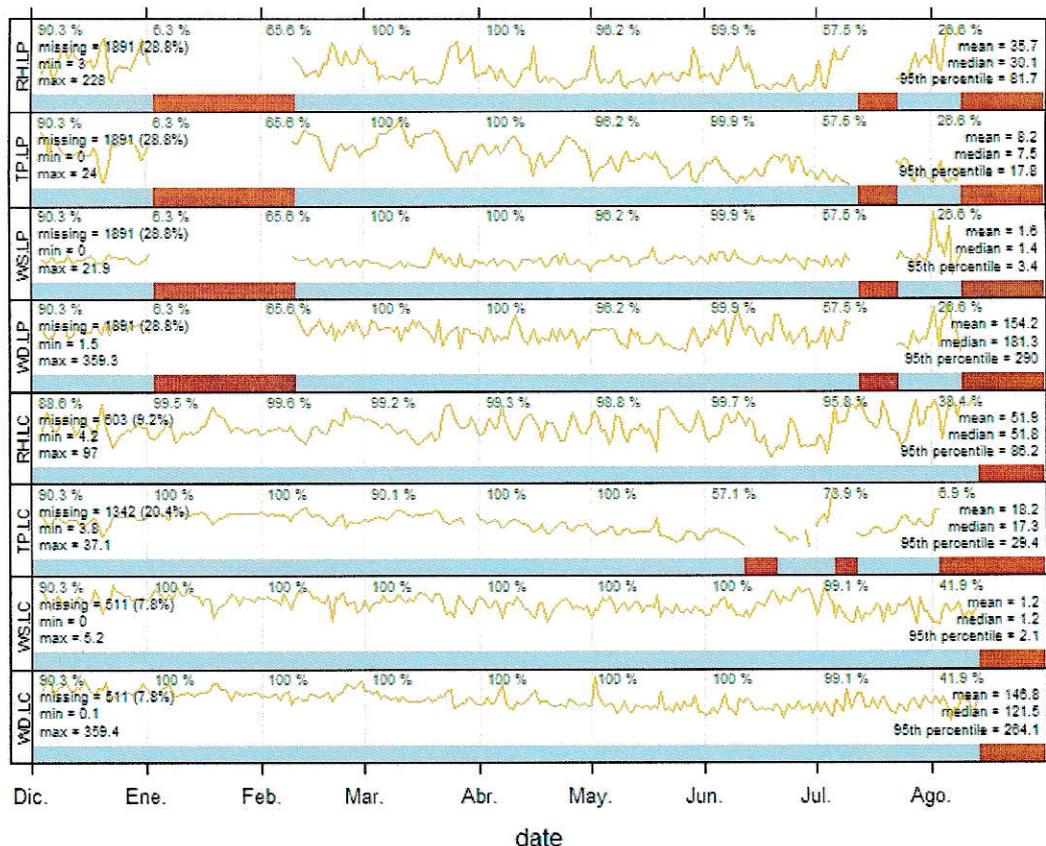


**Figura 12** Gráficos de todos los datos horarios de todos los contaminantes monitoreados y sus porcentajes de disponibilidad mensual. MP= MP<sub>2,5</sub>, CN= CN, LC= Las Condes, LP= La Parva.

La completitud de las mediciones de los parámetros meteorológicos se observa en la Figura 13 (Dirección del viento (WD), Velocidad del viento (WS), Temperatura (TP) y Humedad Relativa (RH), en Las Condes (LC) y La Parva (LP). En las series temporales se observan diferencias en la completitud de la información de las variables medidas.

Las mediciones de los parámetros meteorológicos en LC tienen porcentajes de mediciones totales muy altas; para la dirección del viento (WD), velocidad del viento (WS), y humedad relativa (RH) los porcentajes no descienden del 90%. En cambio, para la temperatura los tres últimos meses de campaña tienen menores porcentajes, en el orden de Julio > Junio > Agosto. Al igual que con las mediciones de MP<sub>2,5</sub> en Las Condes, no sorprende que la mayoría de los parámetros meteorológicos tengan alto porcentaje de mediciones totales.

Por último, las mediciones de los parámetros meteorológicos en LP tienen todos periodos sin mediciones iguales, que son en Enero, Febrero, Julio y Agosto. En Enero el porcentaje de mediciones totales es de un 6,3%, en Febrero es de un 65,6%, en Julio de un 57,5% y en Agosto de un 63,5%. En sí, hubo dos lapsos sin datos, los cuales ocurrieron por fallas en la electricidad.



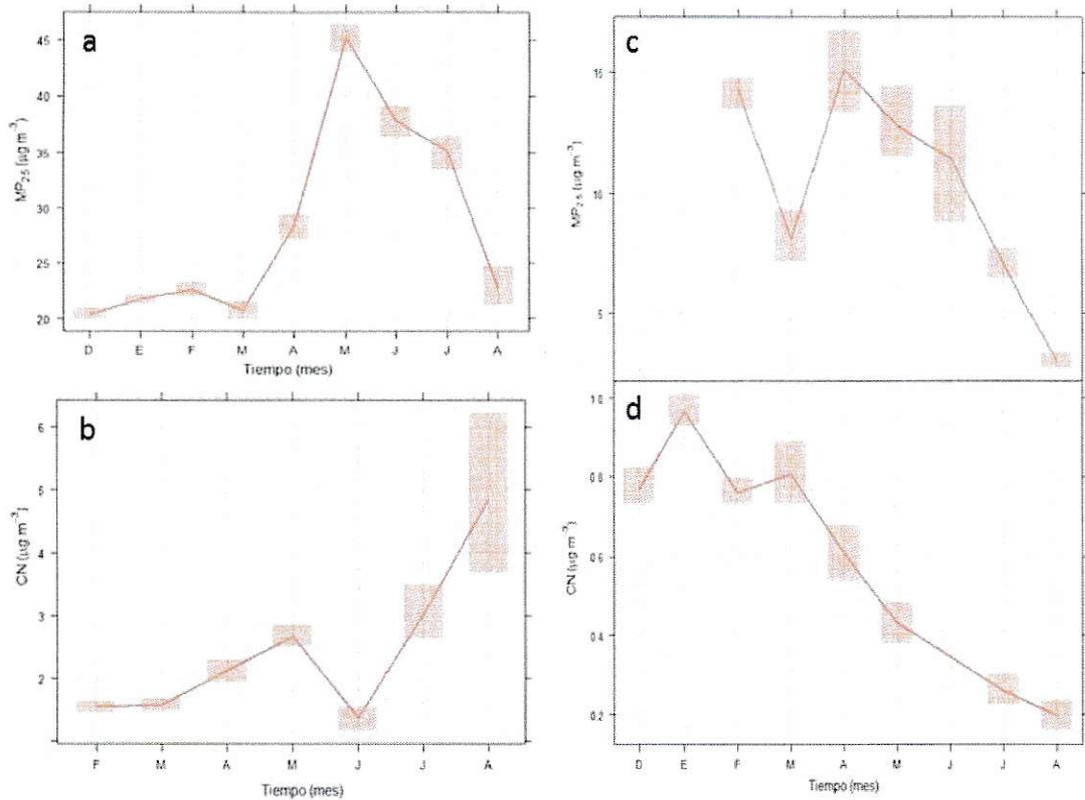
**Figura 13** Gráficos de todos los datos horarios de los parámetros meteorológicos monitoreados y sus porcentajes de disponibilidad mensual. WD= Dirección del viento, WS= Velocidad del viento, TP= Temperatura, RH= Humedad Relativa, LC= Las Condes y LP= La Parva.

### 3.2 Variabilidad espacial y temporal de los datos de contaminación

#### 3.2.1 Análisis de la variabilidad temporal a escala mensual

Los comportamientos mensuales de los contaminantes medidos se muestran en la Figura 14, siendo: (a) la variabilidad mensual del MP<sub>2,5</sub> en Las Condes; (b) la variabilidad mensual del CN en Camino a Farellones; (c) la variabilidad mensual del MP<sub>2,5</sub> en La

Parva; y (d) la variabilidad mensual del CN en La Parva. Además en la Tabla 3 se muestran los resultados de p, para los ANOVA entre cada mes para todos los contaminantes.



**Figura 14** Variabilidad mensual de los datos de  $MP_{2,5}$  en LC (a), CN en el CF (b),  $MP_{2,5}$  y CN en LP (c y d), con las cuadrículas ensombrecidas representando el intervalo de confianza al 95%.

**Tabla 3** Resultados de ANOVA para los datos mensuales de  $MP_{2,5}$  en LC, CN en CF,  $MP_{2,5}$  y CN en LP

Estación	Contaminante	p-value
LC	$MP_{2,5}$	$<2 \cdot 10^{-16}$
CF	CN	$7,22 \cdot 10^{-15}$
LP	$MP_{2,5}$	$<2 \cdot 10^{-16}$
LP	CN	$<2 \cdot 10^{-16}$

En la Tabla 4 se muestran los datos estadísticos del comportamiento mensual del  $MP_{2,5}$  de Las Condes. Los promedios mensuales máximos y mínimos de  $MP_{2,5}$  en LC son  $45,2 \mu\text{g m}^{-3}$  en Mayo y  $17,2 \mu\text{g m}^{-3}$  en Diciembre, respectivamente. Las concentraciones de  $MP_{2,5}$  en los meses de invierno duplican las de verano. Las desviaciones estándar y los intervalos de confianza, al 95%, también aumentan en invierno.

Por otra parte el valor p del ANOVA para el  $MP_{2,5}$  en LC es menor a 0,05, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se dice que hay por lo menos un promedio mensual que es significativamente distinto. Los resultados del test de Bonferroni mostraron valores p menores a 0,05 entre todos los meses, exceptuando entre Enero, Febrero, Marzo y Agosto, por lo tanto los meses de verano tienen una variabilidad similar entre ellos y distinta con los de invierno.

El aumento de las concentraciones en invierno se asocia a la disminución de ventilación y aumentos de las emisiones por calefacción en Santiago, en cambio, el aumento de las desviaciones estándar y de los intervalos de confianza es porque las concentraciones fluctúan entre un rango mayor al estar dependiendo de los cambios de estabilidad de la atmósfera y de las precipitaciones. Por lo tanto, las concentraciones de  $MP_{2,5}$  en LC en los meses de verano son más parecidas entre sí, lo que se comprueba con los valores p del test de Bonferroni, que afirman que los meses de verano tienen una variabilidad igual entre ellos.

**Tabla 4** Valores de los promedios mensuales, sus desviaciones estándar, máximos y mínimos de los datos de MP<sub>2,5</sub> en Las Condes.

Meses	Promedio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Máximo/Mínimo ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Nº de datos horarios
Diciembre	17,2 ± 7,5	64 / 5	618
Enero	21,7 ± 6,8	48 / 6	743
Febrero	22,5 ± 8,7	59 / 5	671
Marzo	20,7 ± 10,4	101 / 4	656
Abril	28,3 ± 16,5	96 / 4	719
Mayo	45,2 ± 21,5	123 / 4	741
Junio	37,9 ± 20,1	113 / 4	714
Julio	35,2 ± 20,2	133 / 4	724
Agosto	22,6 ± 15,6	89 / 4	269
Total	28,7 ± 17,8	133 / 4	5855

En la Tabla 5 se muestran los datos estadísticos del CN en el Camino a Farellones. El promedio mensual máximo y mínimo del CN en CF es 4,85  $\mu\text{g m}^{-3}$  en Agosto y 1,37  $\mu\text{g m}^{-3}$  en Junio, respectivamente. Los promedios mensuales del CN en el CF van aumentando hasta 2,67  $\mu\text{g m}^{-3}$  en Mayo, luego disminuyen a 1,37  $\mu\text{g m}^{-3}$  en Julio y por último, aumentan drásticamente en Julio y Agosto con 3,03  $\mu\text{g m}^{-3}$  y 4,84  $\mu\text{g m}^{-3}$ , respectivamente. En los últimos meses de medición, Julio y Agosto, también se observa un aumento en las desviaciones estándar e intervalos de confianza al 95%.

El ANOVA para los datos mensuales de CN da un p menor a 0,05, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula y se deduce que hay al menos un mes significativamente distinto. Al aplicar el test de Bonferroni se obtiene un p menor a 0,05 para todas las relaciones de Agosto y Julio, por lo tanto estos dos meses tienen una variabilidad significativamente distinta con los otros y entre ellos.

Las concentraciones de CN en CF aumentan en los primeros meses por la dispersión de los contaminantes de Santiago, que aumentan sus concentraciones en esos

meses. Después en el mes de Junio las concentraciones de CN disminuyen producto del descenso de la altura de la capa de mezcla en Santiago, que evita la dispersión de los contaminantes a este lugar. El aumento de las concentraciones de CN en los meses de Julio y Agosto sucede por la apertura de los centros de esquí, que producen un aumento en el tránsito vehicular del Camino a Farellones provocando mediciones de concentraciones altas en la estación.

Por último el aumento de las desviaciones estándar y los intervalos de confianza de las concentraciones de CN en Julio y Agosto se deben a que hay una gran diferencia de las concentraciones entre los días de la semana. El hecho que los meses de Julio y Agosto sean distintos a los otros se corrobora con los resultados del test de Bonferroni, ya que demuestra que tienen una variabilidad diferente entre ellos y los otros meses.

**Tabla 5** Valores de los promedios mensuales, sus desviaciones estándar, máximos y mínimos de los datos de CN en Camino a Farellones.

Mes	Promedio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Máximo /mínimo ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Nº de datos horarios
Febrero	1,55 ± 0,708	3,73 / 0,01	184
Marzo	1,58 ± 0,70	3,69 / 0,03	218
Abril	2,13 ± 1,41	6,20 / 0,01	192
Mayo	2,67 ± 2,56	16,1 / 0,06	529
Junio	1,37 ± 1,26	7,32 / 0,037	162
Julio	3,03 ± 5,58	72,43 / 0,01	472
Agosto	4,85 ± 11,50	115,2 / 0,01	272
Total	2,67 ± 5,30	115,2 / 0,01	2029

En la Tabla 6 se muestran los datos estadísticos del  $\text{MP}_{2,5}$  y CN en La Parva. Las concentraciones máximas para el  $\text{MP}_{2,5}$  y el CN en LP son  $15,1 \mu\text{g m}^{-3}$  en Abril y  $0,966 \mu\text{g m}^{-3}$  en Enero, respectivamente, en cambio, las concentraciones mínimas son  $3,03 \mu\text{g m}^{-3}$  y  $0,20 \mu\text{g m}^{-3}$  en Agosto, para el  $\text{MP}_{2,5}$  y el CN en LP respectivamente. El comportamiento mensual de los dos contaminantes,  $\text{MP}_{2,5}$  y CN, es bastante similar,

exceptuando el mes de Marzo, donde las concentraciones de  $MP_{2,5}$  decrecen y no las de CN. Es posible notar una tendencia de las concentraciones de  $MP_{2,5}$  y CN a disminuir en la temporada invernal.

Los resultados para los ANOVA de los datos mensuales de  $MP_{2,5}$  y CN dan valores p menores a 0,05 rechazando las hipótesis nulas, por lo que para el  $MP_{2,5}$  y el CN hay al menos un mes significativamente distinto. El test de Bonferroni para los dos contaminantes dan los siguientes resultados: para el  $MP_{2,5}$  se destaca que las relaciones del mes de Agosto dan un p menor a 0,05; para el CN se observa que la mayoría de las relaciones entre meses dan p menores a 0,05.

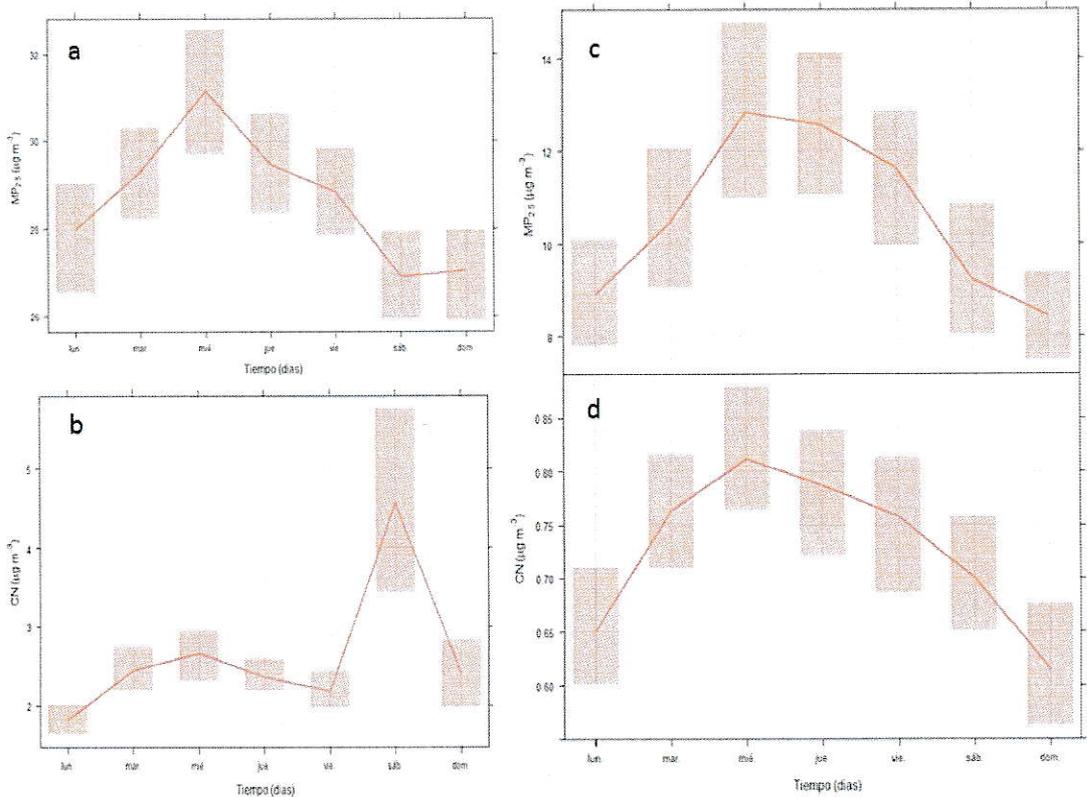
El hecho que las concentraciones de  $MP_{2,5}$  y CN en LP sean distintas puede deberse a diversos factores, como la variabilidad de las mediciones por las condiciones climáticas o los bajos porcentajes de mediciones totales. El comportamiento diferente del  $MP_{2,5}$  en Marzo puede tener relación con la baja cantidad de datos de  $MP_{2,5}$  que se lograron en ese mes. Por otra parte la tendencia de disminuir las concentraciones de  $MP_{2,5}$  y CN en invierno se relaciona a la disminución de altura de la capa de mezcla de Santiago, que se destaca más en esta estación de monitoreo, al estar a mayor altura.

**Tabla 6** Valores de los promedios mensuales, sus desviaciones estándar, máximos y mínimos, número de los datos horarios de MP<sub>2,5</sub> y CN en La Parva.

Periodo	MP <sub>2,5</sub>			CN		
	Promedio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Máx/Mín ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Nº	Promedio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Máx/Mín ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Nº
Diciembre	-	-	-	0,772±0,543	3,46 /0,03	644
Enero	-	-	-	0,966±0,587	2,68 /0,01	709
Febrero	14,3 ± 4,7	27,6 / 5,9	192	0,761±0,518	2,62 /0,02	663
Marzo	8,07 ± 3,93	21,1 / 5	57	0,805±0,900	4,05 /0,01	414
Abril	15,1 ± 12,8	58,9 / 3	179	0,611±0,761	4,02 /0,01	389
Mayo	12,8 ± 12,7	67,7 / 1	298	0,431 ±0,542	4,49 /0,01	289
Junio	11,4 ± 13,1	66,8 / 3,3	103	-	-	
Julio	7,07 ± 5,59	44,4 / 2,2	219	0,26 ± 0,29	1,79 /0,01	201
Agosto	3,03 ± 2,71	20,8 / 1	163	0,20 ± 0,17	0,66 /0,01	79
Total	10,7 ± 10,3	67,7 / 1	1211	0,723 ±0,646	4,49 /0,01	3388

### 3.2.2 Análisis de la variabilidad temporal a escala diaria

Los comportamientos semanales de los contaminantes medidos se muestran en la Figura 15, siendo: (a) la variabilidad diaria del  $MP_{2,5}$  en Las Condes; (b) la variabilidad diaria del CN en Camino a Farellones; (c) la variabilidad diaria del  $MP_{2,5}$  en La Parva; y (d) la variabilidad diaria del CN en La Parva. Además en la Tabla 7 se muestran los resultados de p, para los ANOVA entre cada día para todos los contaminantes.



**Figura 15** Variabilidad diaria de los datos de  $MP_{2,5}$  en LC (a), CN en el CF (b),  $MP_{2,5}$  y CN en LP (c y d), con las cuadrículas ensombrecidas representando el intervalo de confianza al 95%.

**Tabla 7** Resultados de ANOVA para los datos semanales de MP<sub>2,5</sub> en LC, CN en CF, MP<sub>2,5</sub> y CN en LP

Estación	Contaminante	p-value
LC	MP <sub>2,5</sub>	$3,65 \cdot 10^{-6}$
CF	CN	$6,27 \cdot 10^{-10}$
LP	MP <sub>2,5</sub>	$2,22 \cdot 10^{-5}$
LP	CN	$1,32 \cdot 10^{-6}$

En la Figura 15 (a) se presentan los datos de la Variabilidad diaria del MP<sub>2,5</sub> en LC que son representativos al tener un porcentaje de medición mínimo de 94% de los datos horarios totales. La variabilidad diaria del MP<sub>2,5</sub> en LC es bastante baja, ya que tiene una diferencia entre el mayor y menor promedio igual a  $4,2 \mu\text{g m}^{-3}$ . El promedio diario máximo y mínimo para el MP<sub>2,5</sub> en LC es de  $31,3 \mu\text{g m}^{-3}$  el miércoles y  $27,2 \mu\text{g m}^{-3}$  el sábado.

El resultado del ANOVA para el MP<sub>2,5</sub> en LC da un p menor a 0,05, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se dice que hay al menos un día en la semana que es significativamente distinto. El test de Bonferroni muestra muy pocas relaciones entre días que den un p menor a 0,05.

La baja variabilidad de las concentraciones de MP<sub>2,5</sub> en LC entre los días, se explica porque las emisiones en la semana no son tan variables. Con los resultados del test de Bonferroni es posible decir que la mayoría de los días tienen una variabilidad similar, por lo que se asume que las fuentes de emisión tienen iguales comportamientos la mayoría de los días.

En la Figura 15 (b) se muestra la variabilidad diaria de los datos de CN en el Camino a Farellones, donde sus datos son representativos al tener un porcentaje de medición mínimo de 36,6% de los datos horarios totales. El rango de concentraciones de CN en CF va desde  $4,60 \mu\text{g m}^{-3}$  el día sábado hasta  $1,82 \mu\text{g m}^{-3}$  el lunes. El perfil semanal

es similar con el de LC para los días de semana, pero en los días de fin de semana el perfil de CF los sobrepasa. Además las concentraciones de CN del día sábado tienen un gran intervalo de confianza.

El resultado del ANOVA para los datos diarios de CN en CF da un valor p menor a 0,05, rechazando la hipótesis nula e indicando que hay al menos un día con una variabilidad distinta. Por otra parte, el resultado del test de Bonferroni mostró un valor p menor a 0,05 en todas las relaciones del día sábado, rechazando la hipótesis nula.

La razón del por qué el día sábado tiene las mayores concentraciones de CN en CF, es por las emisiones que desencadenan las actividades turísticas que hay en la zona. El día sábado es el día con mayor turismo y las emisiones por el tránsito vehicular y/o por combustión para cocinar aumentan. El análisis estadístico de las relaciones del sábado con los otros días proponen lo mismo, la variabilidad de las concentraciones de CN en CF los días sábados son distintas a los otros días.

En la Figura 15 (c) y (d) se muestran las variabilidades de los datos diarios de MP<sub>2,5</sub> y CN la Parva, siendo los datos representativos al tener porcentajes de medición mínimos de 21,8% y 57,5% de las horas totales medidas, respectivamente. Los rangos de concentraciones van desde 8,5  $\mu\text{g m}^{-3}$  del día domingo hasta 12,8  $\mu\text{g m}^{-3}$  del día miércoles, y desde 0,61  $\mu\text{g m}^{-3}$  del día domingo hasta 0,81  $\mu\text{g m}^{-3}$  el día miércoles, para el MP<sub>2,5</sub> y el CN respectivamente.

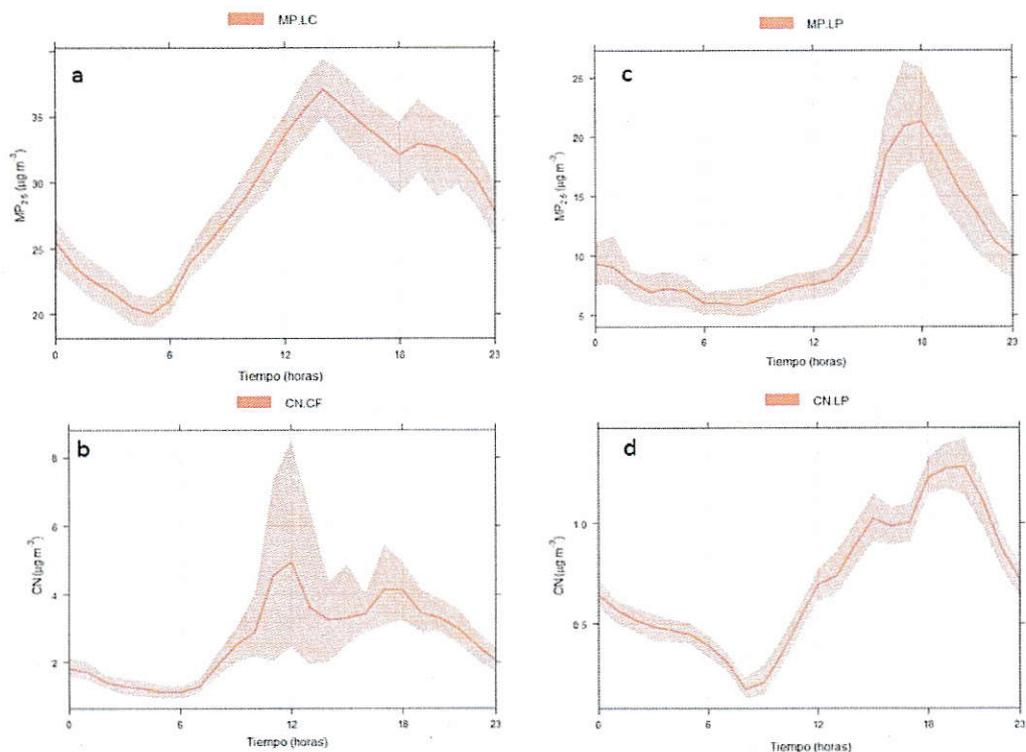
El resultado del análisis de varianza para los datos diarios de La Parva muestra valores de p menores a 0,05, o sea se rechazan las hipótesis nulas y se indica que hay al menos un día con una variabilidad significativamente distinta a la de los otros días. El test de Bonferroni para los dos contaminantes muestra valores de p menores a 0,05 para la mayoría de las relaciones entre los días.

El comportamiento de los dos contaminantes en LP es bastante similar entre sí, y al mismo tiempo se asemeja al perfil de MP<sub>2,5</sub> en LC. Lo anterior demuestra que el CN es parte del MP<sub>2,5</sub> en LP, y al ser sus variabilidades similares al del MP<sub>2,5</sub> en LC podría estar

relacionado a un transporte atmosférico de los contaminantes de LC a LP. Aunque al igual que el contaminante en LC, la variabilidad de los días de los contaminantes de LP, según el test de Bonferroni, no es característica para ningún día.

### 3.2.3 Análisis de la variabilidad temporal a escala diurna

Los comportamientos horarios de los contaminantes medidos se muestran en la Figura 16, siendo: (a) la variabilidad horaria del  $MP_{2,5}$  en Las Condes; (b) la variabilidad horaria del CN en Camino a Farellones; (c) la variabilidad horaria del  $MP_{2,5}$  en La Parva; y (d) la variabilidad horaria del CN en La Parva. Además en la Tabla 8 se muestran los resultados de p, para los ANOVA entre cada hora para todos los contaminantes.



**Figura 16** Variabilidad horaria de los datos de  $MP_{2,5}$  en LC (a), CN en el CF (b),  $MP_{2,5}$  y CN en LP (c y d), con las áreas ensombrecidas representando el intervalo de confianza al 95%.

**Tabla 8** Resultados de ANOVA para los datos semanales de MP<sub>2,5</sub> en LC, CN en CF, MP<sub>2,5</sub> y CN en LP

Estación	Contaminante	p-value
LC	MP <sub>2,5</sub>	$<2 \cdot 10^{-16}$
CF	CN	$7,20 \cdot 10^{-11}$
LP	MP <sub>2,5</sub>	$<2 \cdot 10^{-16}$
LP	CN	$<2 \cdot 10^{-16}$

En la Figura 16 (a) se muestra la variabilidad horaria del MP<sub>2,5</sub> en Las Condes, que resulta ser representativa de la medición con un mínimo de 236 días, de un total de 253 días. La Variabilidad horaria del MP<sub>2,5</sub> en LC tiene un rango de los promedios que va entre 20,01  $\mu\text{g m}^{-3}$  a las 5 horas, hasta 37,07  $\mu\text{g m}^{-3}$  a las 14 horas. Las concentraciones más altas ocurren en la tarde/noche, habiendo dos máximos visibles.

El resultado del ANOVA para los datos horarios de MP<sub>2,5</sub> en LC da un valor p menor a 0,05, lo que implica rechazar la hipótesis nula y que hay al menos una hora en que los datos tienen una variabilidad significativamente distinta. Del test de Bonferroni se obtuvieron p menores a 0,05 entre las horas desde las 11 a las 22 horas y las otras horas.

Los picks de concentraciones de MP<sub>2,5</sub> en LC ocurren en la tarde porque a esas horas es cuando la cantidad de emisiones aumenta y cerca de las 19 horas ocurre porque es la segunda hora de mayor tránsito vehicular. El que las concentraciones de MP<sub>2,5</sub> en LC sean mayores a las horas de tarde y noche da como resultado en el test de Bonferroni que a esas horas la variabilidad de los datos es significativamente distinta con la variabilidad de las concentraciones a las otras horas.

En la Figura 16 (b) se muestra la Variabilidad horaria de los datos de CN en el Camino a Farellones, que es representativa de un mínimo de 79 días sobre un total de 184 días. El rango de concentraciones va desde 1,11  $\mu\text{g m}^{-3}$  a las 6 horas hasta 4,96  $\mu\text{g m}^{-3}$  a

las 12 horas. Las concentraciones horarias de CN en CF tienen dos máximos en el día y en ellos hay una gran variabilidad de los datos.

Por otra parte el resultado de ANOVA es un p menor a 0,05, por lo que se rechaza la hipótesis nula y significa que hay al menos una hora con una variabilidad significativamente distinta de las otras. En el test de Bonferroni se deduce que los datos de las 12 horas son significativamente distintos a los datos entre las 0 y las 8 horas, al dar p menores a 0,05.

Los máximos de concentraciones de CN en CF se asocian a las horas de subida y bajada vehicular por el Camino a Farellones, o sea a las horas de mayor tránsito vehicular. Los dos máximos anteriormente mencionados tienen una gran variabilidad mensual, porque su intervalo de confianza es mayor. El resultado de Bonferroni se asocia a que a las 12 horas se presentan las mayores concentraciones y entre las 0 y 8 horas se presentan las menores concentraciones, por eso es que sus variabilidades son significativamente distintas.

En la Figura 16 (c) y (d) se muestran las variabilidades de los datos horarios del  $MP_{2,5}$  y el CN en la Parva, respectivamente, estos datos son representativos con un mínimo de 47 días sobre un total de 184 y un mínimo de 109 días en un total de 253, para el  $MP_{2,5}$  y el CN respectivamente. Los rangos de concentraciones van desde  $5,82 \mu\text{g m}^{-3}$  a las 8 horas hasta  $21,27 \mu\text{g m}^{-3}$  a las 18 horas, y desde  $0,16 \mu\text{g m}^{-3}$  a las 8 horas hasta  $1,27 \mu\text{g m}^{-3}$  a las 19 horas, para el  $MP_{2,5}$  y el CN, respectivamente. El comportamiento de los dos contaminantes es bastante similar en el perfil, diferenciándose el CN al tener un pick más ancho.

Los resultados de los ANOVA para los datos horarios de  $MP_{2,5}$  y CN en LP dan los valores p menores a 0,05, o sea que se rechazan las hipótesis nulas y se postula que hay al menos una hora con una variabilidad distinta a las otras en los dos casos. El test de Bonferroni para los dos contaminantes y muestra los siguientes resultados:

- i) para el  $MP_{2,5}$  las concentraciones desde las 16 a las 19 horas tienen un p menor a 0,05 cuando se los comparan con las otras horas del día, por lo que se rechazan las hipótesis nulas y se indica que estas relaciones son significativamente distintas;
- ii) para el CN los datos desde las 14 a las 21 horas obtienen valores p menores a 0,05 cuando se las comparan con las horas de la mañana, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se indica que estas relaciones son significativamente distintas.

La pequeña diferencia entre los perfiles de  $MP_{2,5}$  y CN en LP se podría asociar a una dinámica diferente de los contaminantes, haciendo que los dos contaminantes se transporten desde Santiago a Farellones de una manera diferente.

Por otra parte se observa que los máximos de concentración para los dos contaminantes se presentan a una hora tardía del máximo de Las Condes, lo que podría estar asociado al transporte atmosférico. Los resultados de los análisis estadísticos demuestran que las variabilidades de las horas de la tarde son significativamente diferentes a las de la mañana para los dos contaminantes, esto es porque se están comparando las horas con mayores y menores concentraciones, respectivamente.

### **3.3 Variabilidad espacial y temporal de los datos de meteorología**

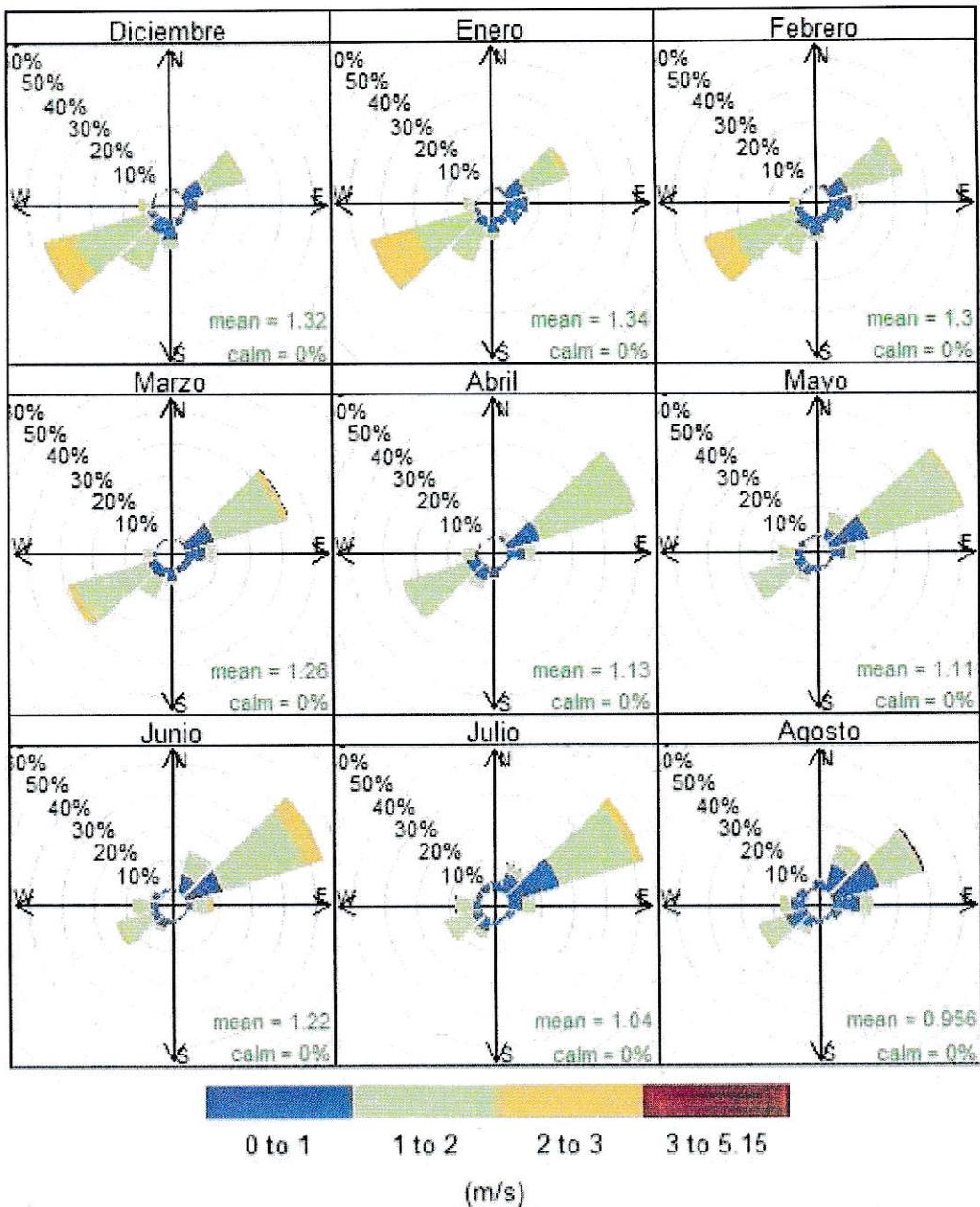
A diferencia del análisis de las concentraciones de contaminantes, el análisis de los parámetros meteorológicos solo se evalúa a escala mensual y diaria, ya que no se presentan mayores diferencias en la variabilidad entre los días de semana.

#### **3.3.1 Análisis de la variabilidad temporal a escala mensual**

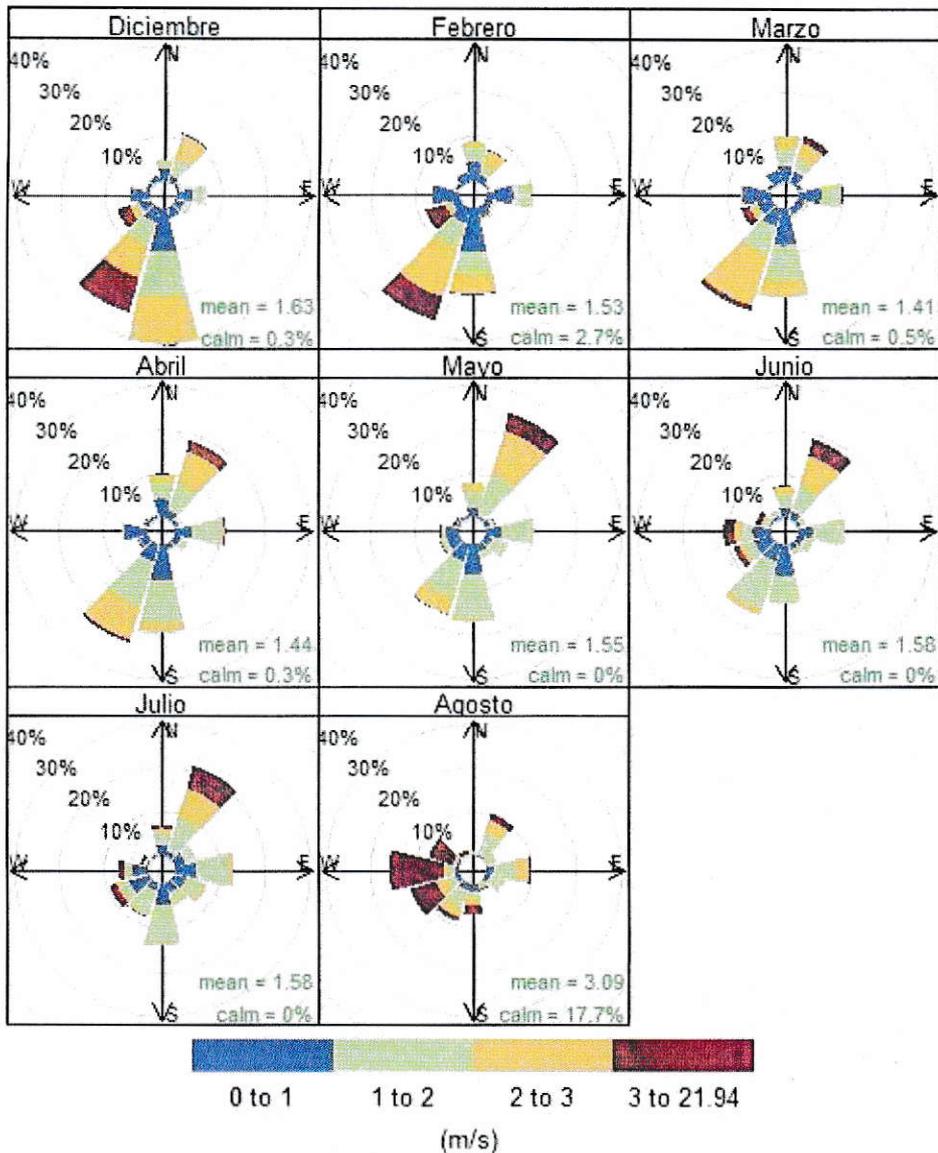
Los comportamientos de los vientos en la LC y LP se observan en las Figuras 17 y 18, respectivamente, donde se muestran las rosas de viento que son representativas al tener los porcentajes mínimos de los datos horarios totales iguales a 99% y 63% para LC y LP, respectivamente. La dirección del viento en LC en los meses de Diciembre, Enero y Febrero es predominante al suroeste ( $225^{\circ}$ - $255^{\circ}$ ), al tener los mayores porcentajes de frecuencia en esa dirección. La variabilidad de la dirección de los vientos para los otros

meses en LC se caracteriza con una disminución en la predominancia de vientos Suroestes y un aumento en la predominancia de los vientos Norestes ( $45^{\circ}$ - $75^{\circ}$ ), exceptuando Agosto que no tiene ninguna dirección predominante. Por lo tanto el transporte atmosférico de las masas de aire contaminadas tendría mayor probabilidad, según los datos anteriores, en los meses de verano.

Los datos del viento de Enero en LP se eliminaron al tener un porcentaje de 6% de los datos totales. La dirección de los vientos en LP para los meses de Diciembre, Febrero y Marzo tienen una predominancia del suroeste ( $195^{\circ}$ - $225^{\circ}$ ) y sur ( $165$ - $195^{\circ}$ ), para los otros meses se pierde esa predominancia y aumenta la predominancia noreste ( $15^{\circ}$ - $45^{\circ}$ ). En el mes de Agosto no hay una dirección del viento predominante en LP, al igual que en LC. Por los datos anteriores se presume que el transporte atmosférico de Santiago a Farellones se daría en los meses de verano.



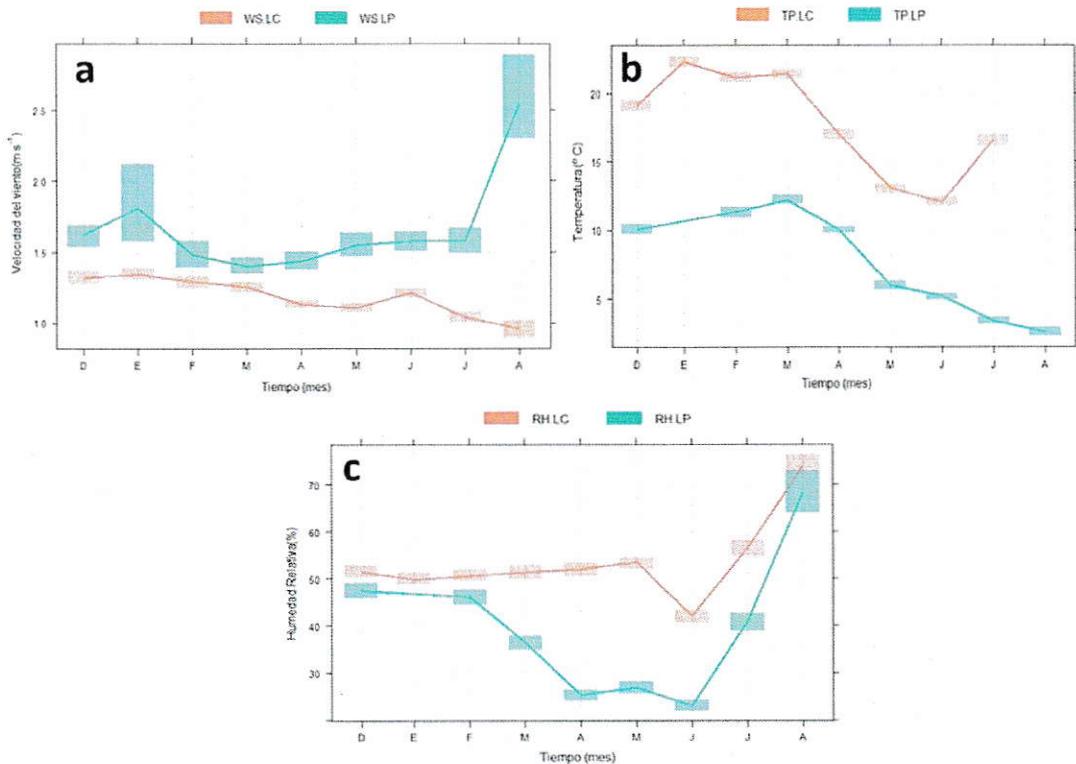
**Figura 17** Rosas de vientos para todos los meses monitoreados en la estación Las Condes.



**Figura 18** Rosas de vientos para todos los meses monitoreados en la estación La Parva.

En la Figura 19 se muestran las variabilidades mensuales para los datos de velocidad de los vientos (WS-a), temperatura (TP-b) y humedad relativa (RH-c) para las dos estaciones. Los datos de velocidad del viento son representativos al tener los porcentajes mínimos de los datos horarios totales iguales a 99% y 63% para LC y LP,

respectivamente. Los datos de temperatura son representativos al tener los porcentajes mínimos de los datos horarios totales iguales a 57%, aunque se eliminan los datos de Agosto y Enero para LC y LP respectivamente. Los datos de humedad relativa son representativos al tener los porcentajes mínimos de los datos horarios totales iguales a 91% y 57% para LC y LP, respectivamente, aunque se eliminan los datos del mes de Enero para LP al ser pocos.



**Figura 19** Variabilidad mensual de los datos de velocidad del viento (WS-a), temperatura (TP-b) y humedad relativa (RH-c) en Las Condes (LC) y La Parva (LP), con las cuadrículas representando el intervalo de confianza al 95%.

Los valores de las velocidades de viento en LP son mayores a los de LC en todos los meses medidos. El perfil en las dos estaciones es similar, al no haber mucha variación entre los meses, siendo la excepción el mes de Agosto en LP, donde se alcanzó el promedio de 2,54 m/s. Lo anterior puede estar asociado a que LP se enfrenta a otra circulación atmosférica, posiblemente por el cajón del Maipo.

Lo más relevante de las velocidades de viento es que las máximas se observan en la dirección de predominancia en todos los meses y para las dos estaciones. Por lo tanto es probable que a sitios lejanos, que se encuentren en la dirección predominante del viento, lleguen concentraciones de los contaminantes de la estación monitoreada. Estaríamos suponiendo que las concentraciones de LC podrían llegar a LP y que las concentraciones de LP podrían llegar a glaciares que se encuentren al noreste.

Todas las temperaturas mensuales de LC son mayores que las de LP, lo cual estaría relacionado con la diferencia de altura, ya que a mayor altura menor temperatura. Los perfiles que se forman son similares entre las estaciones, con un máximo en Marzo con 21,4° C y 12,2° C para LC y LP respectivamente.

La diferencia que se presenta en los perfiles son los promedios en los meses de Julio y Agosto, que en LC aumentan y en LP disminuyen. La disminución de temperaturas en LC podría afectar al transporte atmosférico desde LC a LP, ya que esto probablemente esté relacionado a una disminución de la altura de la capa de mezcla de Santiago. La disminución de la altura de la capa de mezcla se vería en una disminución en el transporte atmosférico de LC a LP, ya que disminuye el transporte vertical, siendo que LP está a cercano a los 2700 m.s.n.m.

Los máximos y mínimos mensuales de la humedad relativa ocurren en los mismos meses para las dos estaciones, Agosto y Junio respectivamente. En los meses de otoño la humedad relativa tiene un comportamiento diferente entre las dos estaciones, ya que en LC hay un pequeño aumento y en LP hay una gran disminución. La disminución de la humedad relativa en LP puede estar asociada a que en esos meses las masas de aire son más secas, ya que la altura de la capa de mezcla disminuye e impide que las masas de aire de Santiago (húmedas) alcancen las alturas de LP.

### **3.3.2 Análisis de la variabilidad temporal a escala horaria**

Los comportamientos horarios de los vientos en la LC y LP se observan en las Figuras 20 y 21, respectivamente, donde se muestran las rosas de viento que son representativas al tener los porcentajes mínimos de los datos horarios totales iguales a 99,6% y 75,5% para LC y LP, respectivamente. La dirección del viento en LC es predominante del suroeste en el intervalo de las 9 a las 18 horas. En LP la dirección del viento es predominante del sur y suroeste entre las 9 y 19 horas.

Por lo tanto, el tiempo en que el viento tiene una dirección proveniente del suroeste, misma dirección de Santiago, y con las velocidades más altas es entre las 9 y 19 horas. Entonces el transporte atmosférico entre Santiago y este sector Cordillerano sería entre las 9 y 19 horas.

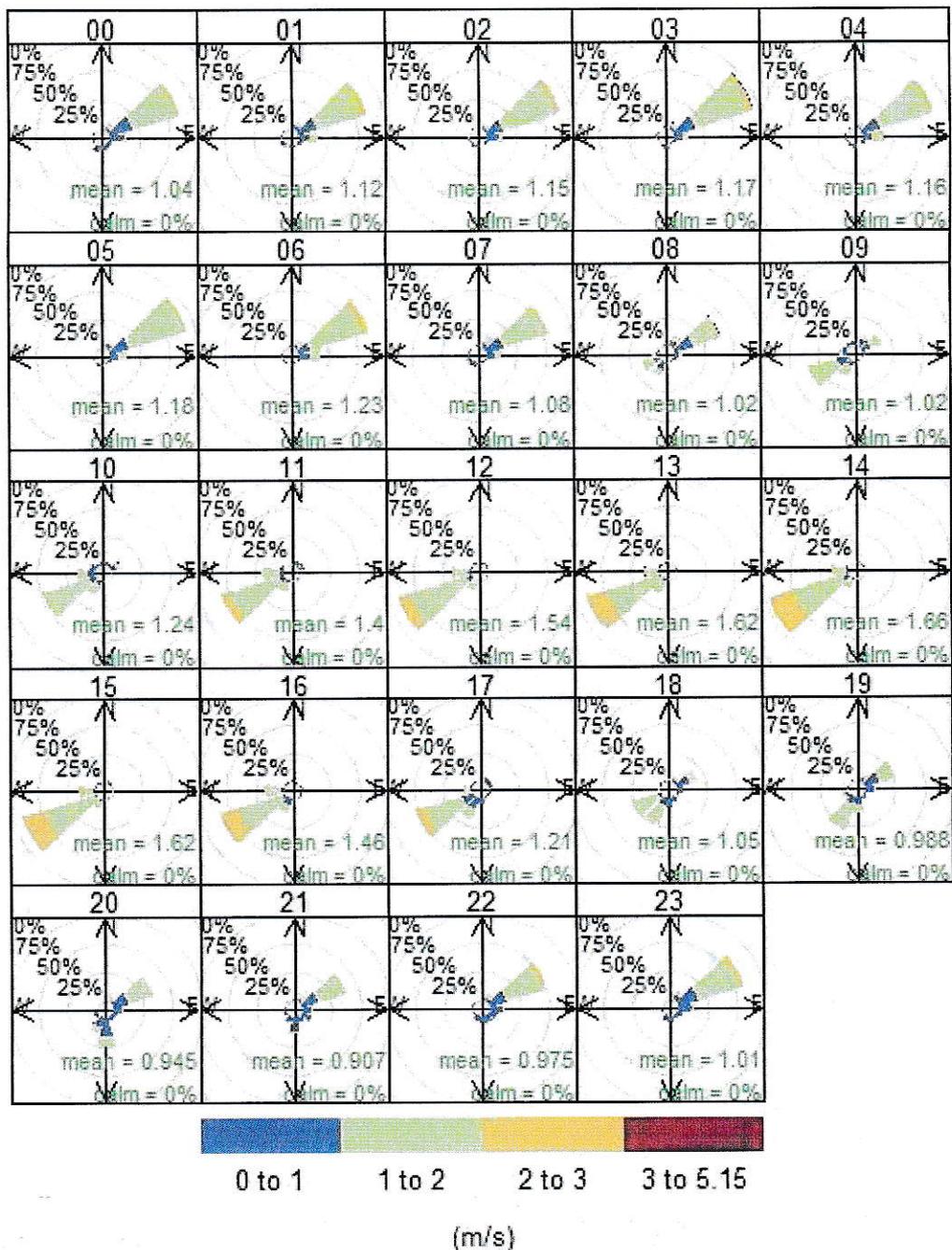
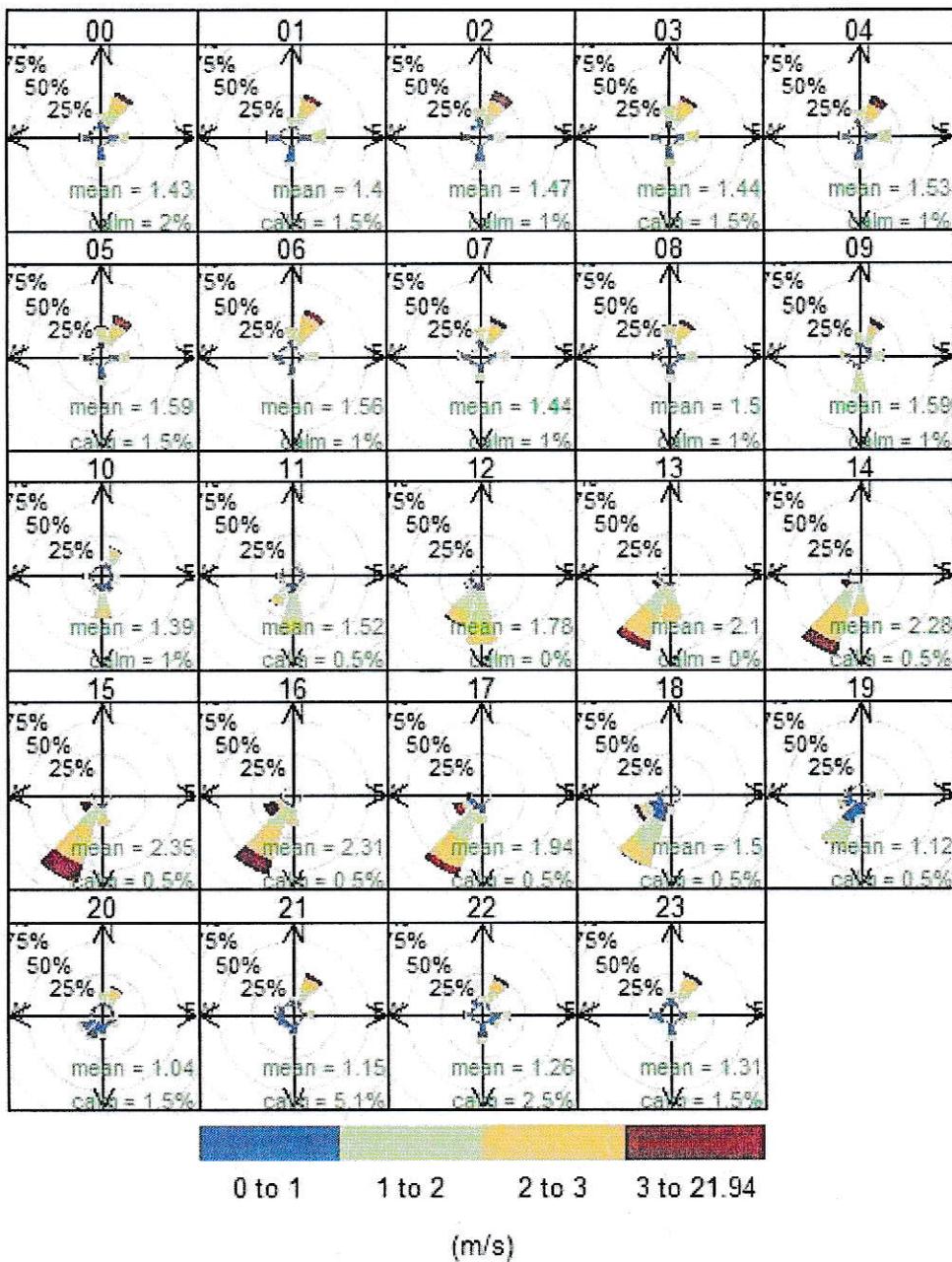


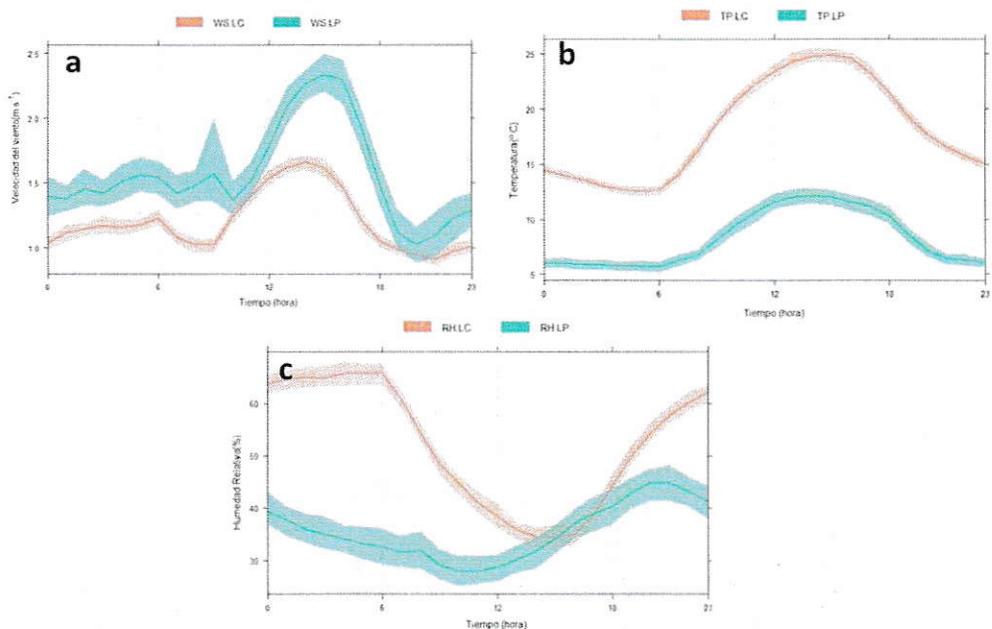
Figura 20 Rosa de los vientos promedio para cada hora en la estación Las Condes.



**Figura 21** Rosas de los vientos promedio de las horas del día en La Parva.

En la Figura 22 se muestran las variabilidades horarias para los datos de velocidad de los vientos (WS-a), temperatura (TP-b) y humedad relativa (RH-c) para las dos estaciones. Los datos de velocidad del viento son representativos al tener los porcentajes mínimos de los datos horarios totales iguales a 99,6% y 75,5% para LC y LP, respectivamente. Los datos de temperatura son representativos al tener los porcentajes mínimos de los datos horarios totales iguales a 86% y 75% para LC y LP, respectivamente. Los datos de humedad relativa son representativos al tener los porcentajes mínimos de los datos horarios totales iguales a 94,8% y 75,5% para LC y LP, respectivamente.

En los perfiles diarios de las velocidades del viento de LC y LP, mostrados en la Figura 22, se observa como las velocidades en LC son siempre mayores que las de LP. Además el perfil de LP está desplazado como por 1 hora al de LC, lo cual se asociaría a que los mismos vientos pasan primero por LC y después por LP, lo que se asociaría positivamente al transporte atmosférico de LC a LP.



**Figura 22** Variabilidad horaria de los datos de velocidad del viento (WS-a), temperatura (TP-b) y humedad relativa (RH-c) en Las Condes (LC) y La Parva (LP), con las áreas ensombrecidas representando el intervalo de confianza al 95%.

La variabilidad de los datos horarios de la temperatura (TP) en LC y LP se observa en la Figura 22 (b), donde la representatividad de la medición son los porcentajes mínimos de 86% y 75% del total de los datos horarios de la temperatura. Los perfiles de las dos estaciones se ven bastante similares, siendo la única diferencia los valores más altos en LC que en LP. En LC y LP los máximos horarios son 24,9° C y 12,4° C, respectivamente.

La variabilidad horaria de los datos de humedad relativa (RH) se plasma en la Figura 22 (c), siendo representativa en la medición de los porcentajes mínimos de 94,8% y 75,5% del total de los datos horarios para LC y LP, respectivamente. Los perfiles de las estaciones son bastante diferentes: los máximos son 65,7% a las 5 horas y 45,0% a las 20 para LC y LP, respectivamente; y los mínimos son 34,4% a las 15 horas y 28,0% a las 11 horas para LC y LP, respectivamente.

Las horas de la madrugada son las con mayores valores de RH en LC, en cambio en LP, la tarde/noche son las horas con mayores valores. En LC ocurre un comportamiento normal de la humedad relativa dependiendo mayormente de la temperatura o la luz solar, aumentando con el frío o noche y disminuyendo con el calor o el día. El extraño comportamiento de la humedad relativa en LP debe estar relacionado a vientos húmedos que lleguen a la tarde, ya que la humedad relativa depende tanto de la temperatura como del vapor de agua que esté presente en la atmósfera.

### 3.4 Relación entre las concentraciones de los contaminantes medidos

En las siguientes gráficas se evalúa la relación de los contaminantes medidos ( $MP_{2,5}$  y CN ) en las distintas estaciones en escalas de tiempo mensuales, diarias y horarias. Para poder comparar mejor las variabilidades de los componentes se estima el CN en LC según el  $MP_{2,5}$  medido, suponiendo que el CN es un 7,4% del  $MP_{2,5}$ , porcentaje anual que fue calculado por Toro y col (2013) en la misma estación durante 6 años de muestreo.

En la Tabla 9 se observan las comparaciones que se realizarán con sus respectivos tiempos, los cuales fueron elegidos por la completitud de cada contaminante medido. La primera relación es entre el  $MP_{2,5}$  y el CN en LP, de esta comparación se busca encontrar la proporción entre los dos contaminantes y como varía en el tiempo, para los meses de Febrero, Mayo, Julio y Agosto. La siguiente relación es entre los CN medidos o estimados en cada estación de monitoreo, buscando el transporte atmosférico entre cada estación. Por la completitud de los datos se relacionan las concentraciones de CN en las tres estaciones durante los días 13 al 20 de Febrero. Luego se relacionan las concentraciones de CN de LC y CF durante los meses de Julio y Agosto, en donde las concentraciones de CN en CF aumentan por un incremento en las actividades turísticas. Por último se relaciona las concentraciones de CN de LC y LP para los meses de Diciembre a Abril, período de temperaturas cálidas, donde la probabilidad de encontrar un transporte atmosférico es alta.

**Tabla 9** Relaciones entre contaminantes a tratar en esta sección, según estación de monitoreo y tiempo.

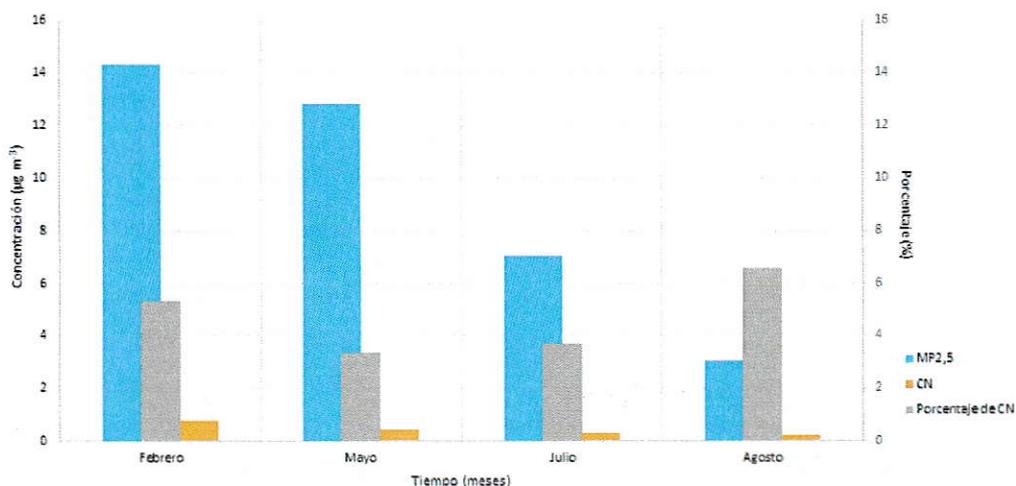
Relación	Estaciones de monitoreo	Tiempo
$MP_{2,5}$ y CN	LP	Febrero, Mayo, Julio y Agosto
CN*	LC-CF-LP	13-20 Febrero
	LC-CF	Julio y Agosto
	LC-LP	Diciembre-Abril

CN\*: las concentraciones de LC son estimadas por las concentraciones medidas de  $MP_{2,5}$  y en LP se incluyen concentraciones estimadas por las concentraciones medidas de  $MP_{2,5}$ .

### 3.4.1 Relación de MP<sub>2,5</sub> y CN medidos en LP

Los datos de ambos contaminantes tienen porcentajes mayores al 20% de los datos totales en cada mes. En la Figura 23 se muestran los promedios mensuales de los contaminantes y los porcentajes promedios mensuales de CN en MP<sub>2,5</sub>. Los porcentajes promedios máximo y mínimo de CN en MP<sub>2,5</sub> se obtuvieron en Agosto y Mayo, respectivamente, con valores iguales a 6,57% y 3,36%, respectivamente. Al analizar estos meses es posible dividirlos en dos períodos, antes y después de la apertura de los centros de esquí, ya que es probable que la composición de MP<sub>2,5</sub> se vea muy comprometida por las emisiones de las actividades invernales que se realizan en el segundo período.

Como en Febrero y Mayo no hay emisiones por parte de las actividades invernales, las disminuciones no proporcionales de las concentraciones de MP<sub>2,5</sub> y CN se asocian a que el MP<sub>2,5</sub> tiene más fuentes de emisión que no se ven afectadas por el cambio de mes. Por lo tanto se asume que las concentraciones de CN se ven mayormente afectadas por la disminución del transporte atmosférico de los contaminantes de Santiago.

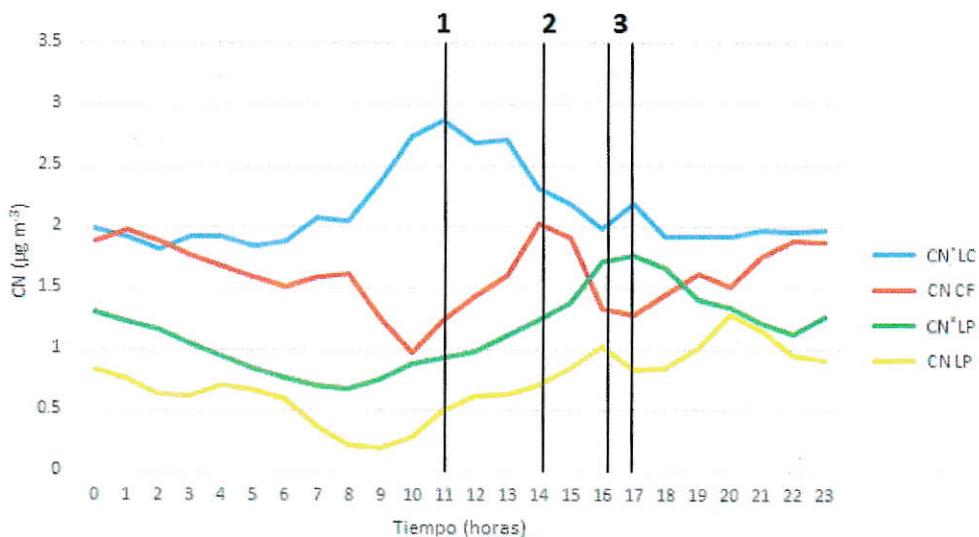


**Figura 23** Gráfico de las concentraciones promedios mensuales de MP<sub>2,5</sub> y CN en LP junto con los porcentajes promedios mensuales de CN en MP<sub>2,5</sub>.

Los datos de esta sección aportaron con el porcentaje de CN en la composición de  $MP_{2,5}$  en LP para el mes de Febrero, igual 5,3%, que se usará para calcular el valor de CN estimado ( $CN^*$ ) en la sección 3.4.2.

### 3.4.2 Relación del CN en las tres estaciones de monitoreo

En la Figura 24 se muestran los perfiles diurnos del CN en los tres sitios para los días del 13 al 20 de Febrero. En la gráfica se destacan tres tiempos donde aparecen los máximos de los CN en los tres sitios. El primer tiempo es cercano a las 11 horas y corresponde a la concentración de CN estimada igual a  $2,7 \mu g m^{-3}$ . El segundo tiempo es cercano a las 14 horas en CF con una concentración de CN medida igual a  $2,0 \mu g m^{-3}$ . El tercer tiempo entre las 16 y 17 horas representa los máximos del CN medido y estimado en LP, iguales a  $1,7 \mu g m^{-3}$  y  $1 \mu g m^{-3}$ , respectivamente.



**Figura 24** Variabilidad horaria de los datos de CN estimado en LC ( $CN^*LC$ ), CN medido en CF ( $CN.CF$ ), CN estimado y medido en LP ( $CN^*.LP$  y  $CN.LP$ ) para una semana de Febrero, con las áreas ensombrecidas representando el intervalo de confianza al 95%.

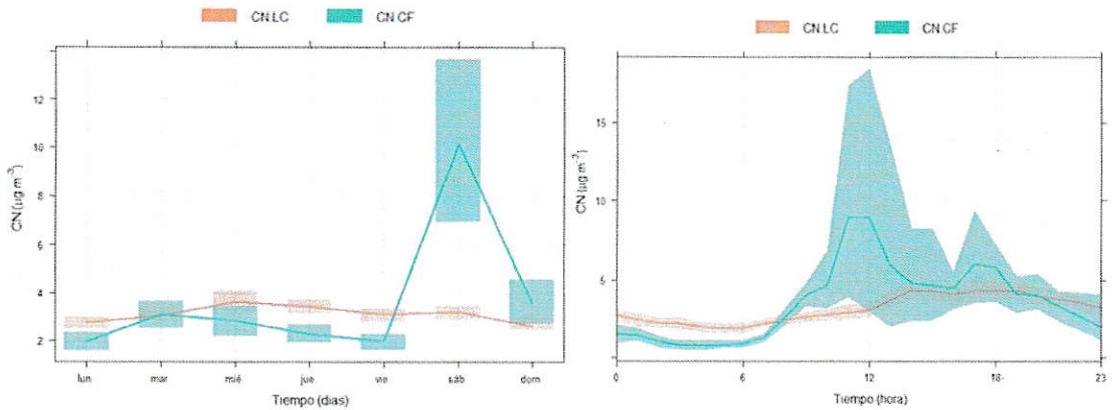
Los perfiles diurnos de todos los CN medidos y estimados son similares y tienen sus máximos corridos temporalmente, probablemente por la distancia que tienen con respecto a Santiago. La asociación anterior afirmaría un transporte atmosférico de CN desde LC a LP en los días del 13 al 20 de Febrero.

### 3.4.3 Relación del CN entre LC-CF

Los perfiles semanales y diurnos de CN en LC y CF en Julio y Agosto se comparan en la Figura 25. De la variabilidad semanal destacan los días sábado y domingo, donde las concentraciones de CN en CF son mayores que en LC, lo que se asocia al aumento de tráfico por las actividades turísticas que aumentan los días de fin de semana. El gran intervalo de confianza del día sábado para las concentraciones de CN en CF está relacionado a la diferencia mensual que tienen, ya que en los meses de invierno se abren los centros de esquí provocando un gran aumento en el tránsito vehicular del fin de semana.

Por otra parte la variabilidad horaria muestra dos picks de las concentraciones de CN en CF, iguales a  $9,0 \mu\text{g m}^{-3}$  a las 11 horas y a  $6,0 \mu\text{g m}^{-3}$  a las 17 horas. Estas horas se identifican como las horas con mayor tráfico vehicular en la ruta a Farellones, por lo que las concentraciones de CN aumentan. De esta manera se comprueba que el ascenso y descenso de los turistas a los centros de esquí afecta en las concentraciones de CN medidas en CF.





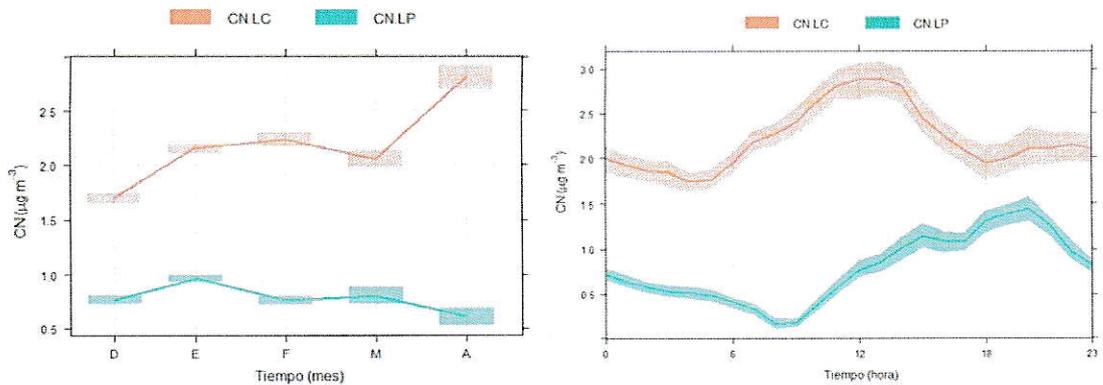
**Figura 25** Variabilidad diaria de los datos de CN estimado en LC (CN.LC) y CN medido en CF (CN.CF) en Julio y Agosto, con las áreas ensombrecidas representando el intervalo de confianza al 95%.

#### 3.4.4 Relación del CN entre LC-LP

Las variabilidades mensuales y horarias de CN en LC y LP durante el período de Diciembre a Abril se comparan en la Figura 26. Es posible observar como las concentraciones promedio mensuales de LC son mayores que las de LP.

Las proporciones de las concentraciones mensuales de LP en LC van disminuyendo a medida pasan los meses, tienen su máximo en Diciembre y su mínimo en Abril, siendo 45% y 21% respectivamente. Esto indica que el transporte atmosférico desde Santiago hasta Farellones es mayor en los meses más cálidos, donde la altura de la capa de mezcla es mayor. De la variabilidad horaria se observa como el máximo de LC es mayor que el de LP y que está desplazado por aproximadamente 7 horas.

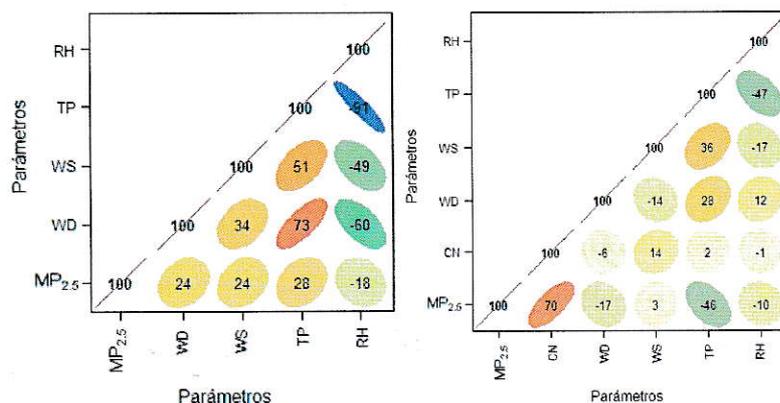
Los máximos horarios serían  $2,9 \mu\text{g m}^{-3}$  a las 13 horas y  $1,4 \mu\text{g m}^{-3}$  a las 20 horas en LC y LP respectivamente. Esto indica que el transporte atmosférico desde Santiago a Farellones probablemente se demore 7 horas, lo cual se evaluará en la sección 3.6.



**Figura 26** Variabilidad mensual (izquierda) y horaria (derecha) de los datos de CN en LC y LP para los meses de Diciembre-Abril, con las áreas ensombrecidas representando el intervalo de confianza al 95%.

### 3.5 Relación entre las concentraciones de contaminantes y los parámetros meteorológicos

En la Figura 27 se observan las matrices de correlación entre las concentraciones de contaminantes y los datos de los parámetros meteorológicos en Las Condes y La Parva. En ningún caso hay una correlación entre los contaminantes y los parámetros meteorológicos mayor a 0,5, por lo que para encontrar una relación será necesario hacer las rosas de contaminantes de los gráficos bipolares.



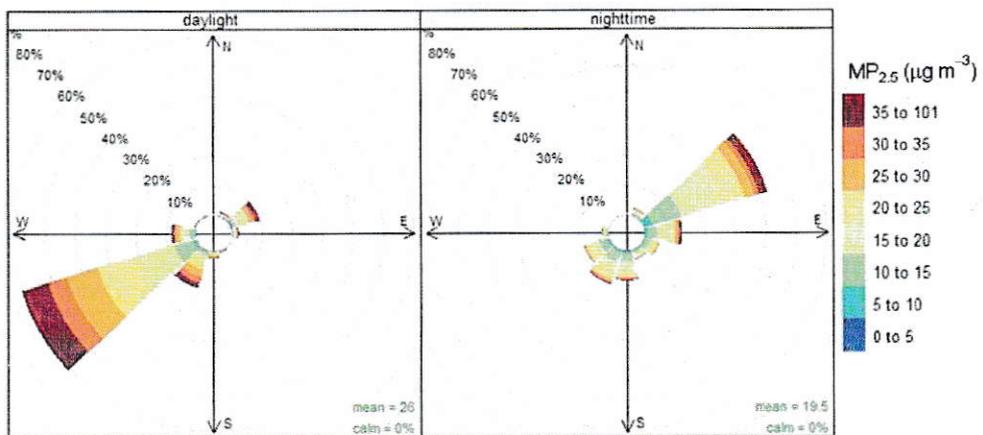
**Figura 27** Matrices de correlación de los parámetros contaminantes contra los meteorológicos en Las Condes (izquierda) y La Parva (derecha).

### 3.5.1 Rosas de Contaminantes

En la Figura 28 se muestran las rosas de contaminantes para el  $MP_{2,5}$  en LC para el día (daylight) y la noche (nighttime) para el período de Diciembre-Abril. El comportamiento de los vientos y de las concentraciones de  $MP_{2,5}$  en LC se definiría como:

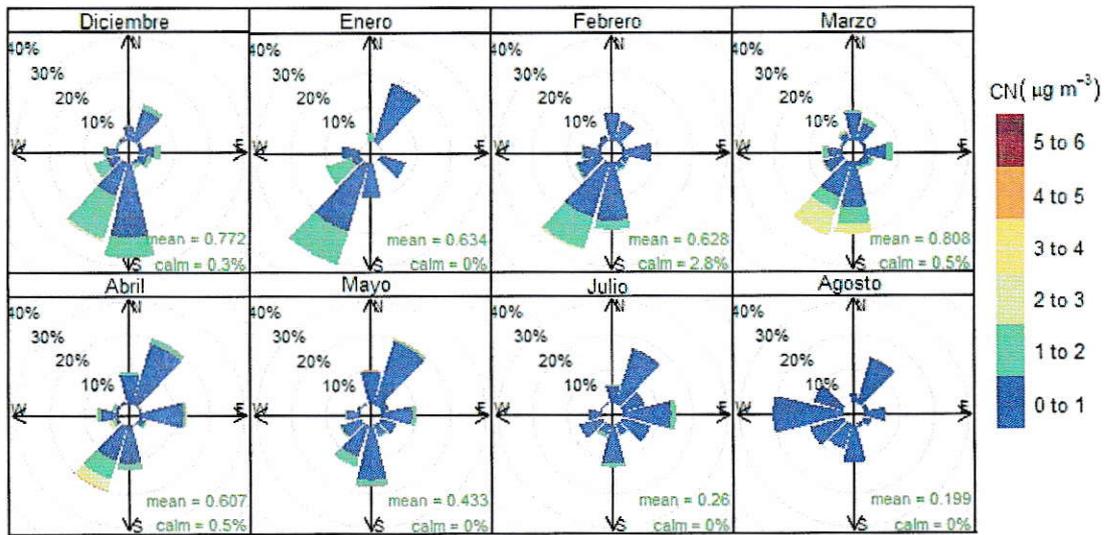
- (i) en el día las concentraciones más altas y con mayores frecuencias provienen del suroeste;
- (ii) en la noche las concentraciones más altas y con mayores frecuencias provienen del noreste.

Si en el día las concentraciones más altas y con mayor frecuencia provienen del suroeste, significa que se dirigen al noreste en donde se ubica el sector cordillerano analizado.



**Figura 28** Rosa de contaminantes para el  $MP_{2,5}$  en la estación de LC desde Diciembre a Abril.

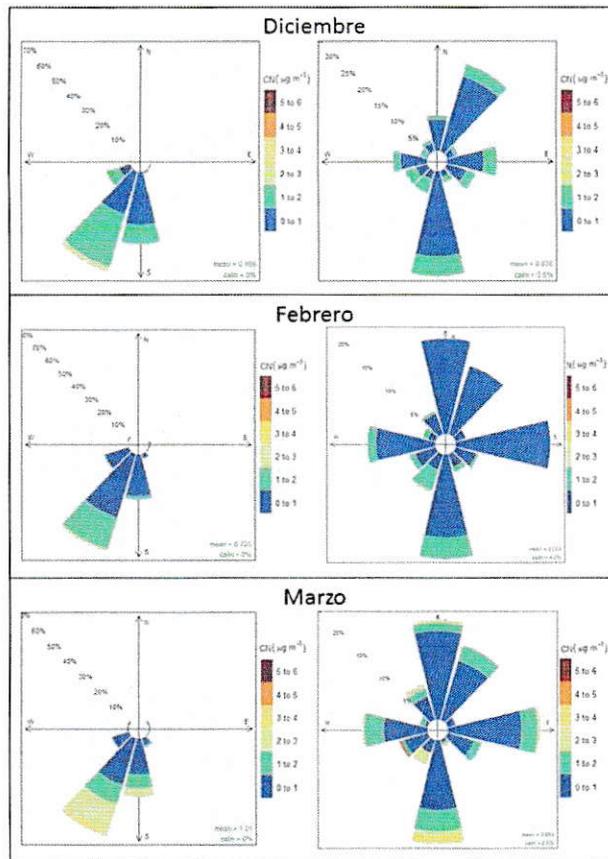
En la Figura 29 se muestran las rosas mensuales de contaminantes para el CN en LP. Los meses con una dirección predominante del suroeste son los desde Diciembre a Marzo, presentando las concentraciones de CN más altas en la misma dirección. Por lo tanto serían estos meses a analizar para encontrar un transporte atmosférico desde Santiago al sector cordillerano.



**Figura 29** Rosas mensuales de contaminantes para el CN en la estación de LP.

En la Figura 30 se muestran las rosas de contaminantes para el CN en LP en los meses de Diciembre, Febrero y Marzo, diferenciando en los intervalos de tiempo de las 10-19 horas y de las 20-9 horas.

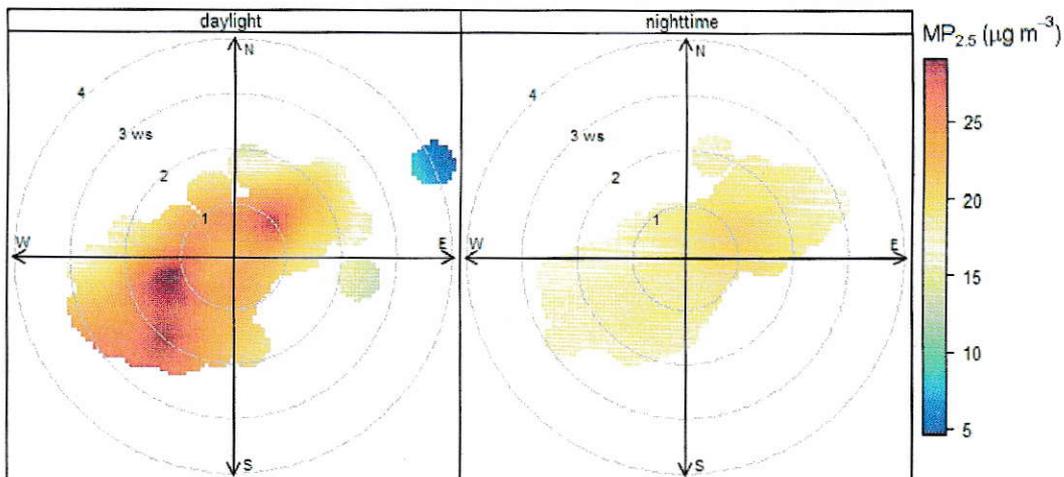
Los comportamientos de los vientos y de las concentraciones de los contaminantes son bastante similares para los tres meses. En el día las concentraciones vienen del suroeste y sur, con las concentraciones más altas que provienen del suroeste. La explicación para ello es que el CN se transporta desde Santiago, que queda al suroeste de la estación LP, desviándose un poco al sur por la geografía del lugar. Las concentraciones de CN son un poco más altas en el mes de Marzo, en el día y la noche, lo que podría estar asociado a nuevas fuentes de emisiones cercanas a la estación.



**Figura 30** Rosas de contaminantes para el CN en la estación de LP entre las 10-19 horas (izquierda) y entre las 20-9 horas (derecha).

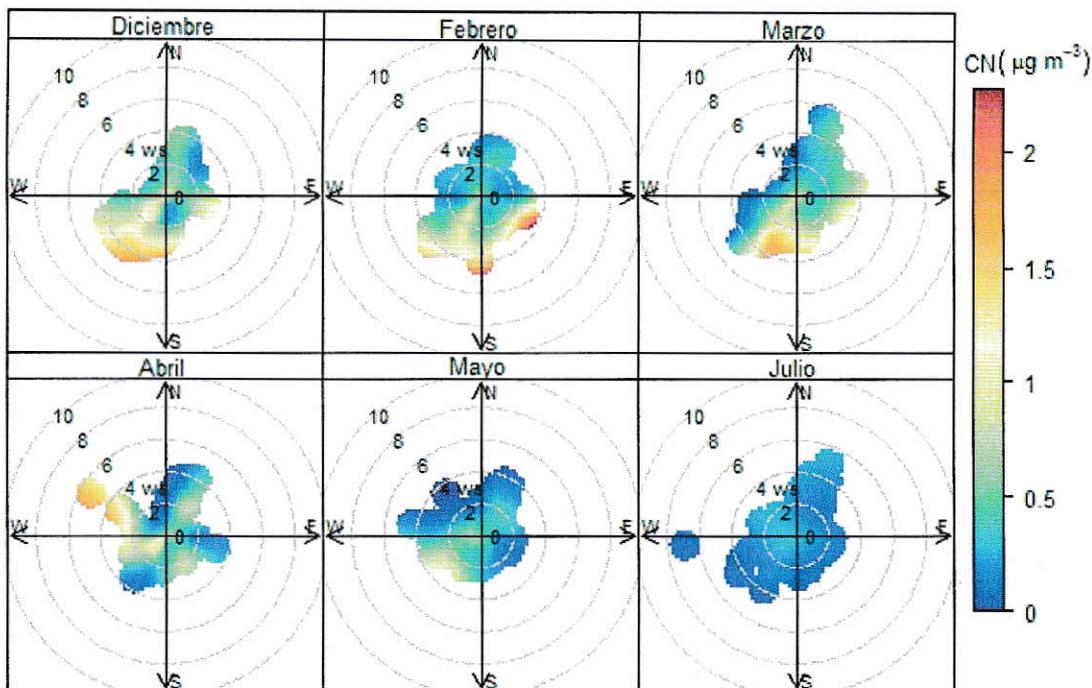
### 3.5.2 Gráficos bipolares de concentraciones

En la Figura 31 se observa la gráfica polar del  $MP_{2,5}$  en LC. En el día hay focos de altas concentraciones provenientes del suroeste y otro proveniente del noreste. Hay altas probabilidades de que las concentraciones de  $MP_{2,5}$  que lleguen a LC con velocidades mayores a 2 m/s y de una dirección suroeste luego se transporten a LP.



**Figura 31** Gráficas polares de las concentraciones de  $MP_{2,5}$ , velocidad y dirección de los vientos en LC en el periodo de verano, para el día (izquierda) y la noche (derecha).

En la Figura 32 se muestran las gráficas polares mensuales para el CN en LP. Los meses que muestran focos de emisiones de CN del suroeste son Diciembre, Febrero y Marzo. En Diciembre y Marzo se observa de manera única el aporte de altas concentraciones de CN de una fuente lejana proveniente del Suroeste, en cambio, en Febrero se visualizan otras dos fuentes independientes que aportan altas concentraciones de CN. Por lo tanto, las gráficas polares de estos meses se diferencian entre dos períodos horarios, entre las 10 y 19 horas y entre las 20 y 9 horas.



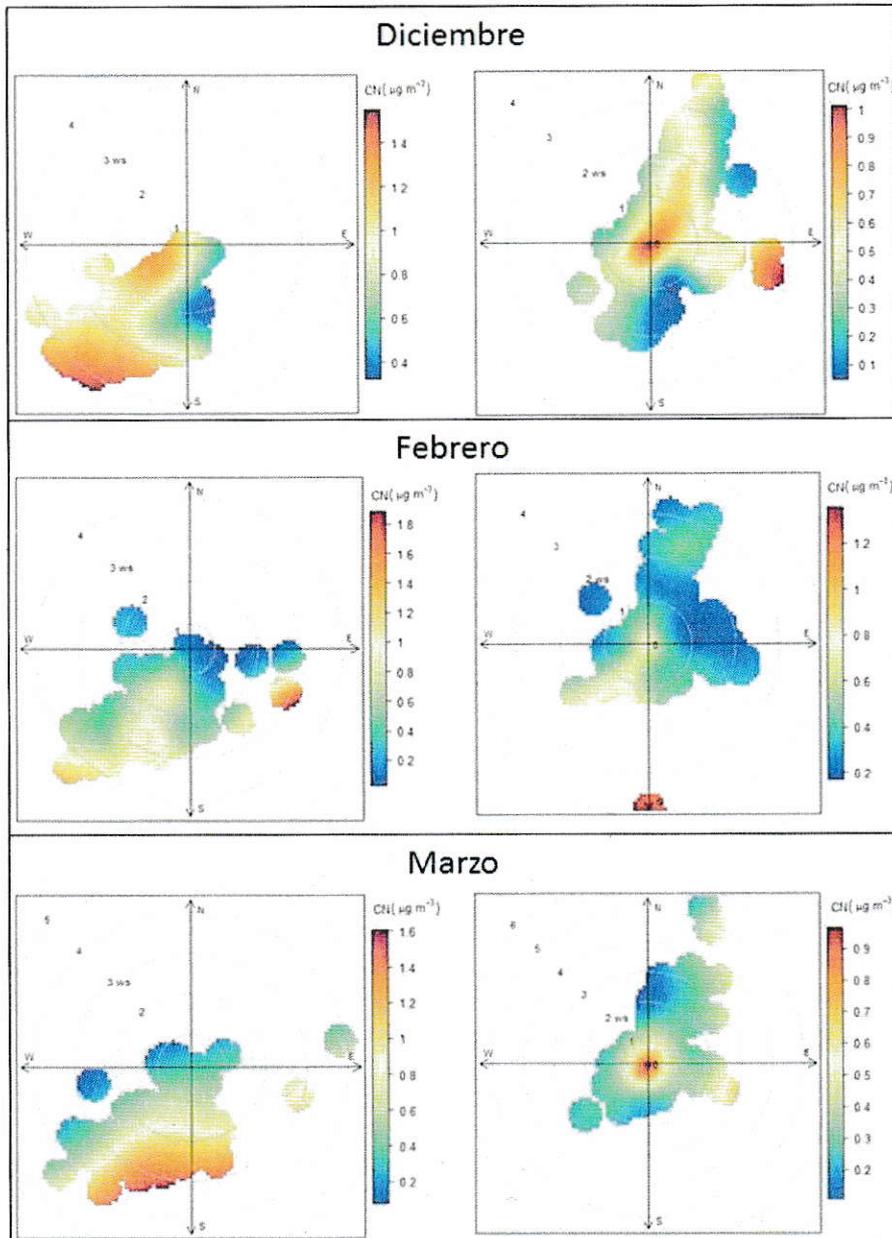
**Figura 32** Gráficas polares mensuales de las concentraciones de CN en LP.

En la Figura 33 se muestran las gráficas polares de CN en LP de los meses de Diciembre, Febrero y Marzo diferenciando en los intervalos de tiempo de las 10 a las 19 horas y de las 20 y 9 horas.

Se asociará a una fuente lejana cuando los puntos se encuentren por sobre los círculos de las velocidades del viento de 3 m/s. En estos gráficos es posible ver las variabilidades de los meses:

- (i) en Diciembre a las horas diurnas las concentraciones altas de CN provienen claramente de una fuente lejana al Suroeste y de una fuente cercana más al Oeste, en cambio, a las horas nocturnas la mayoría de las concentraciones altas de CN provienen de fuentes locales;
- (ii) en Febrero a las horas diurnas solo se observa una fuente lejana al Suroeste de CN con un punto arbitrario al Sureste, en cambio, a las horas nocturnas no se observa ninguna fuente clara de CN;

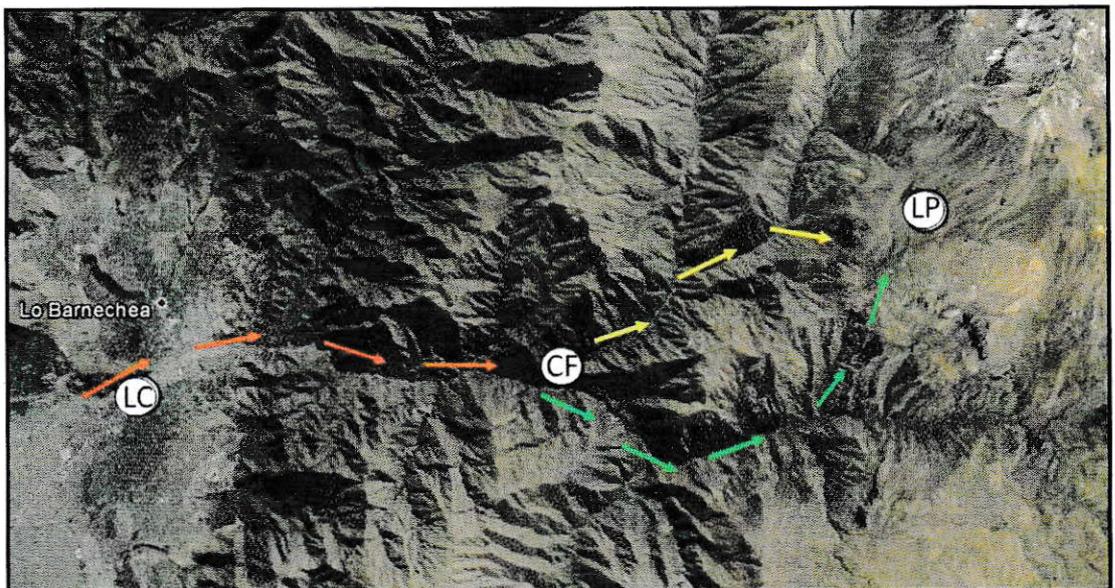
- (iii) en Marzo se observa que las altas concentraciones diurnas de CN provienen del Sur y del Suroeste, en cambio, en las horas nocturnas las altas concentraciones de CN provienen muy claro de una fuente local.



**Figura 33** Gráficos polares para el CN en la estación de LP entre las 10-19 horas (izquierda) y entre las 20-9 horas (derecha).

Las distintas direcciones de las fuentes de CN para cada mes se asocian a las características geográficas del sector, ya que la circulación de los contaminantes debe seguir un camino geográfico para llegar a LP.

En la Figura 34 se muestran a imagen satelital por donde se indica la circulación supuesta de los contaminantes para llegar a LP. En el mes de Diciembre la circulación de los vientos probablemente pase por las flechas amarillas y verdes. En Febrero y Marzo la circulación solo provenga por las flechas verdes.

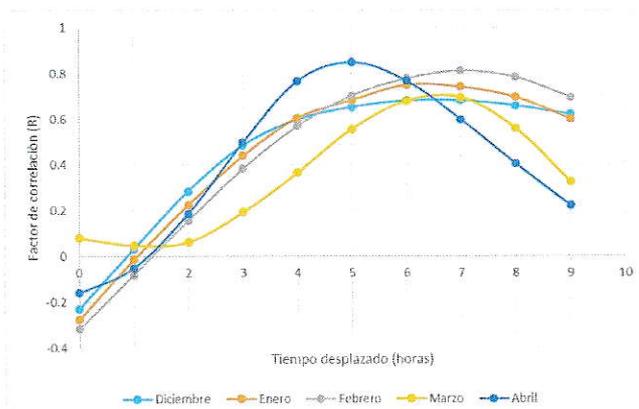


**Figura 34** Imagen satelital con la circulación de los vientos supuesta, la salida de los vientos de Santiago que atraviesan la ruta del Camino a Farellones (rojos), la bifurcación de los vientos que entran por el estero Yerba Loca hasta subir a LP (amarillos) o que siguen una ruta a la derecha que luego aumenta su altura hasta llegar a LP (verde).

### 3.6 Tiempo del transporte atmosférico

En la Figura 35 se muestran los perfiles del factor de correlación dependiendo de las horas desplazadas para cada mes del periodo de verano. En Diciembre, Enero y Marzo el tiempo de transporte atmosférico sería de 7 horas según el gráfico; en Febrero sería de 6 horas; y en Abril de 5 horas.

Por lo tanto el tiempo promedio de transporte atmosférico en el período de verano es de 6,4 horas. Teniendo en cuenta que la distancia desde la estación LC a la de LP es de 26,8 km, la velocidad de transporte sería igual a 1,16 m/s. Al ser esta velocidad menor de la velocidad del viento que llega con las más altas concentraciones, igual a 3 m/s, es posible concebir el transporte atmosférico desde Santiago a Farellones, ya que las masas de aire se ven perturbadas con diversos factores ambientales que disminuyen la eficiencia de la velocidad del transporte.



**Figura 35** Perfil del factor de correlación dependiendo del tiempo desplazado de los perfiles de CN en LP y MP<sub>2,5</sub> en LP, en horas para cada mes de verano.

#### IV CONCLUSIONES

En este estudio se investigó el transporte atmosférico desde Santiago al sector cordillerano, Farellones, desde Diciembre del 2014 a Agosto del 2015, en especial para los contaminantes  $MP_{2,5}$  y CN.

Como principales conclusiones es posible mencionar:

- En Las Condes las concentraciones del  $MP_{2,5}$  aumentan en invierno por la mala ventilación y aumentan en la tarde por las altas emisiones a esas horas.
- Las emisiones de Santiago se transportan hacia la estación Camino a Farellones hasta Mayo y luego las concentraciones de CN aumentan por la apertura de los centros de esquí que hacen incrementar el tránsito vehicular del camino.
- Las emisiones de Santiago se transportan hacia la estación La Parva hasta Marzo y las horas a las que llegan son entre las 10 y las 19 horas.
- Los vientos en La Parva que indican un transporte atmosférico de los contaminantes de Santiago tienen una dirección suroeste y con velocidades alrededor de los 3,5 m/s.
- El transporte atmosférico, en una semana de Febrero, se comprueba al tener perfiles diurnos de CN en las tres estaciones de monitoreo corridos en el tiempo.
- Relacionando los vientos y las concentraciones de CN en LP se comprueba el transporte atmosférico analizado en los meses de Diciembre, Febrero y Marzo para las horas de las 10 a las 19.
- El transporte atmosférico de Santiago al sector cordillerano en los meses de verano se demoraría alrededor de 6 horas y tendría una velocidad de transporte igual a 1,16 m/s.

- Como posibles mejoras en el estudio sería instalar equipos de medición de los parámetros meteorológicos en Camino a Farellones y hacer un análisis de la composición del  $MP_{2,5}$  medido en los tres sitios.

Las consecuencias del transporte atmosférico desde Santiago a un sector cordillerano, en este caso Farellones, podría ocasionar problemas en el ecosistema de Farellones, donde existe un Santuario de la Naturaleza y en las alturas grandes áreas de glaciares cordilleranos.

## V BIBLIOGRAFÍA

Agrawal, M., Singh, B., Rajput, M., Marshall, F. y Bell, J.N.B. 2003. Effect of air pollution on peri-urban agriculture: a case study urban air pollution has a negative impact in peri-urban agriculture. *Environmental Pollution* **126**: 323-330.

Ancelet, T., Markwitz, A. y Weatherbum, D.C. 2014. Sources and transport of particulate matter on hourly time-scale during the winter in New Zealand urban valley. *Urban Climate*, doi: 10.1016/j.uclim.2014.06.003.

Areskoug, H., Canner, P., Dahlen, S., E., Lastbom, L., Nyberg, F. y Pershagen, G. 2000. Particles in ambient air – a health risk assessment. *Am J Epidemiol* **26**: 1. 1-96.

Artaxo, P., Oyola, P. y Martinez, R. 1999. Aerosol composition and source apportionment in Santiago de Chile. *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B* **150**. 409-416.

Barrios, S., Peña-Cortés, F. y Osses, S. 2004. Efectos de la Contaminación Atmosférica por material particulado en las enfermedades respiratorias agudas en menores de 5 años. *Ciencia y Enfermería X (2)*: 21-29.

Brasseur, G., P., Prinn, R. G., y Pszenny, A. 2003. Atmospheric chemistry in a changing world: an integration and synthesis of a decade of tropospheric chemistry research. The International global atmospheric chemistry project of the International Geosphere-Biosphere Programme. Berlín, Alemania.

Bond, T.C., Doherty, S.J., Fahey, D.W., Forster, P.M., Berntsen, T., DeAngelo, B.J., Flanner, M.G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P.K., Sarofim, M.C., Schultz, M.G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N., Guttikunda, S.K., Hopke, P.K., Jacobson, M.Z., Kaiser, J.W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J.P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S.G. y Zender, C.S. 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment. *J Geophys Res.* **118**(11):5380–5552.

Carlaw, D. C. y Ropkins, K. 2011. Openair- an R package for air quality data analysis. Preprint submitted to *Environmental Modelling & Software*.

Cavieres, L. y Arroyo, M. 1999. Tasa de enfriamiento adiabático del aire en el Valle del Río Molina, Provincia de Santiago, Chile central (33° S). *Revista Geográfica de Chile Terra Australis.* **44**: 79-86.

CCAC. 2014. Time to Act: to reduce short-lived climate pollutant. *Climate and Clean Air Coalition to Reduce Short-Lived Climate Pollutants*. United Nations Environment Programme. Paris, Francia.

Cifuentes, L.A., Vega, J., Köpfer, K. y Lave, L.B. 2011. Effect of the fine fraction of Particulate Matter versus the Coarse Mass and Other Pollutants on Daily Mortality in Santiago, Chile. *Journal of the Air & Waste Management Association* **50**: 1287-1298.

- CONAMA RM. 1996. Antecedentes para la Declaración de Zona Saturada de la Región Metropolitana. CONAMA-Región Metropolitana. Santiago, Chile.
- Daily, G. C. 1997. Introduction: what are ecosystem services? In: Daily GC, editor. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems. pp.1-10. Washington (DC): Island Press.
- Di Castri, F. y Hajek, E. 1976. Bioclimatología de Chile, Santiago, Chile. Ediciones de la Pontificia Universidad Católica de Chile, pp. 163. Santiago, Chile.
- Didyk, B., Simoneit, B., Pezoa, A., Riveros, L., Flores, A. 2000. Urban aerosol particles of Santiago, Chile: organic content and molecular characterization. *Atmospheric Environment* **34**: 1167-1179.
- DMC. 2013. Climatology. Santiago, Chile: Dirección Meteorológica de Chile, Dirección General de Aeronáutica Civil; <http://www.meteochile.gob.cl> Acceso: 13/10/2015.
- Dockery, D.W. 2009. Health Effects of Particulate Air Pollution. *Ann Epidemiol* **19**:257-263.
- Donaldson, K., Stone, V., Seaton, A. y W. MacNee. 2001. Ambient particle inhalation and the cardiovascular system: potential mechanism. *Environ. Health Perspect.* **109** (4): 523-527.
- Gold, D.R., Litonjua, A.A., Zanobetti, A., Coull, B.A., Schwartz, J., Maccallum, G., Verrier, R.L., Nearing, B.D., Canner, M.J., Suh, H. y Stone, P.H. 2005. Air pollution and ST-segment depression in elderly subjects. *Environ. Health Perspect.* **113**:883-887.
- Gramsch, E., Catalán, L., Ormeño, I. y Palma, G. 2000. Traffic and seasonal dependence of the light absorption coefficient in Santiago de Chile. *APPLIED OPTICS*. Vol. **39**, No. 27.
- Grantz, D. A., Garner, J. H. B. y Johnson, D. W. 2003. Ecological effects of particulate matter. *Environment International* **29**, 213-239.
- Frank, N. 2006. The Chemical Composition of PM2.5 to support PM Implementation. AQAG/AQAD USEPA.
- Huang, W., Tan, J., Kan, H., Zhao, N., Song, W., Song, G., Chen, G., Jiang, L., Jiang, C., Chen, R. y Chen., B. 2009. Visibility, air quality and daily mortality in Shanghai, China. *Science of the Total Environment*, Vol. **407**: 10. 3295-3300.
- Ihl, M. 2010. La tendencia del smog de Santiago y su control en los últimos veinte años (1989-2009). *Anales. Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas*. pp. 44-50. Santiago, Chile.
- Ilabaca, M., Olaeta, I., Campos, E. y Villaire, J. 1999. Association between Levels of Fine Particulate and Emergency Visits for Pneumonia and other Respiratory Illnesses among

Children in Santiago, Chile. *Journal of the Air & Waste Management Association*, Vol. **49**: 9. 154-163.

INE. 2002. Censo 2002 del Distrito Censal Farellones. Instituto Nacional de Estadísticas, República de Chile. Pedido por Gobierno Transparente 13/02/2015.

INE. 2012. Agropecuarias, Informe Anual 2012. Capítulo 1: Estadísticas Agrícolas. Instituto Nacional de Estadísticas, República de Chile, <http://www.ine.cl> Acceso: 21/11/2015.

INE. 2013. Producto estadísticos, Medio Ambiente. Instituto Nacional de Estadísticas, República de Chile, <http://www.ine.cl> Acceso: 21/11/2015.

Jansen, K.L., Larson, T.V., Koenig, J.Q., Mar, T.F., Fields, C., Stewart, J. y Lippmann, M. 2005. Associations between Health Effects and Particulate Matter and Black Carbon in Subjects with Respiratory Disease. *Environ. Health Perspect.* **113**: 1741-1746.

Kim, J.J, Smorodinsky, S., Lisett, M., Singer, B., Hodgson, A.T. y Ostro, B. 2004. Traffic-related air pollution near busy roads: the East Bay Children's Respiratory Health Study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine.* **170** (5): 520-526.

Leiva, M., Santibañez, D., Ibarra, S., Matus, P. y Seguel, R. 2013. A five-year study of particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) and cerebrovascular diseases. *Environmental Pollution* **181**: 1-6.

Lipi, K. y Kumar, M. 2013. Study of Aerosol black carbon and Aerosol optical Depth over Ranchi during winter in Northern India. *International Journal of Engineering Research & Technology.* **2**(10): 3189-3195.

MacNee, W. y Donaldson, K. 2000. How can ultrafine particles be responsible for increased mortality?. *Monaldi Arch. Chest. Dis.* **55** (2): 135-9.

Mahajan, S., Evans, K.J., Hack, J.J. y Truesdale, J. 2013. Linearity of Climate Response to Increases in Black Carbon Aerosols. *Journal of Climate* **26** (20): 8223-8237.

Molina, M. y Molina, L. 2004. Megacities and Atmospheric Pollution. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **54**: 6, 644-680. DOI: 10.1080/10473289.2004.10470936.

Morales, R. 2006. Contaminación atmosférica urbana. Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago. Editorial Universitaria. Santiago. Chile.

Muñoz, R. y Undurraga, A. 2010. Daytime Mixed Layer over the Santiago Basin: Description of Two Years of Observations with a Lidar Ceilometer. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **49**: 1728-1741.

OMS. 2014. Ambient (Outdoor) Air Quality and Health Organization.

O'Neill, M.S., Veves, A., Zanobetti, A., Sarnat, J., Gold, D.R., Economides, P.A., Horton, E.S. y Schwartz, J. 2005. Diabetes Enhances Vulnerability to Particulate Air Pollution-Associated Impairment in Vascular Reactivity and Endothelial Function. *Circulation* **111**: 2913-2920.

Ostro, B., Sanchez, J.M., Aranda, C. y Eskeland, G.S. 1996. Air Pollution and mortality: results from study of Santiago, Chile. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* **6** (1): 97-114.

Park, S.S y Lee, K-H. 2015. Characterization and sources of black carbon in PM at site close to a roadway in Gwangju, Korea, during winter. *Environmental Sciences: Processes and Impacts*. doi: 10.1039/c5em00225g.

Pauly, N. 2009. Impaired visibility: the air pollution people see. *Atmospheric Environment* **43**: 182-195.

Pawar, H., Garg, S., Kumar, V., Sachan, H., Arya, R., Sarkar, C., Chandra, B.P., y Sinha, B. 2015. Quantifying the contribution of long-range transport to Particulate Matter (PM) mass loading at a suburban site in the North-Western Indo Gangetic Plain (IGP). *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, **15**: 11409-11464.

Peters A, Liu E, Verrier RL, Schwartz J, Gold D, Mittleman M, et al. 2000. Air pollution and incidence of cardiac arrhythmia. *Epidemiology* **11**:11-17.

Petzold, A., Ogren, J.A., Fiebig, M., Laj, P., Li, S.-M., Baltensperger, U., Holzer-Popp, T., Kinne, S., Pappalardo, G., Sugimoto, N., Wehrli, C., Wiedensohler, A. y Zhang, X.-Y. 2013. Recommendations for the interpretation of "black carbon" measurements. *Atmos Chem Phys Discuss.* **13**: 9485-9517.

Pope, C.A.III, Burnett, R.T, Thurston, G.D, Thun, M.J., Calle, E.E, Krewski, D. y Godleski, J.J. 2004. Cardiovascular Mortality and Long-Term Exposure to Particulate Air Pollution: Epidemiological Evidence of General Pathophysiological Pathways of Disease. *Circulation* **109**: 71-77.

Román, O., Prieto, M. y Mancilla, P. 2004. Contaminación atmosférica y daño cardiovascular. *Rev Med*; **132**: 761-767.

Romero, H., Ihl, M., Rivera, A., Zalazar, P. y Azocar, P. 1999. Rapid urban growth, land-use changes and air pollution in Santiago, Chile. *Atmospheric Environment* **33**: 4039-4047.

Santibañez, F. y Uribe, M. 1993. Atlas aroclimático de la V Región y Región Metropolitana, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Ministerio de Agricultura. Fondo de Investigación Agropecuaria. Corporación Nacional de Fomento, pp. 65. Santiago, Chile.

Schmitz, R. 2004. Modelling of air pollution dispersion in Santiago de Chile. *Atmospheric Environment* **39**: 2035-2047.

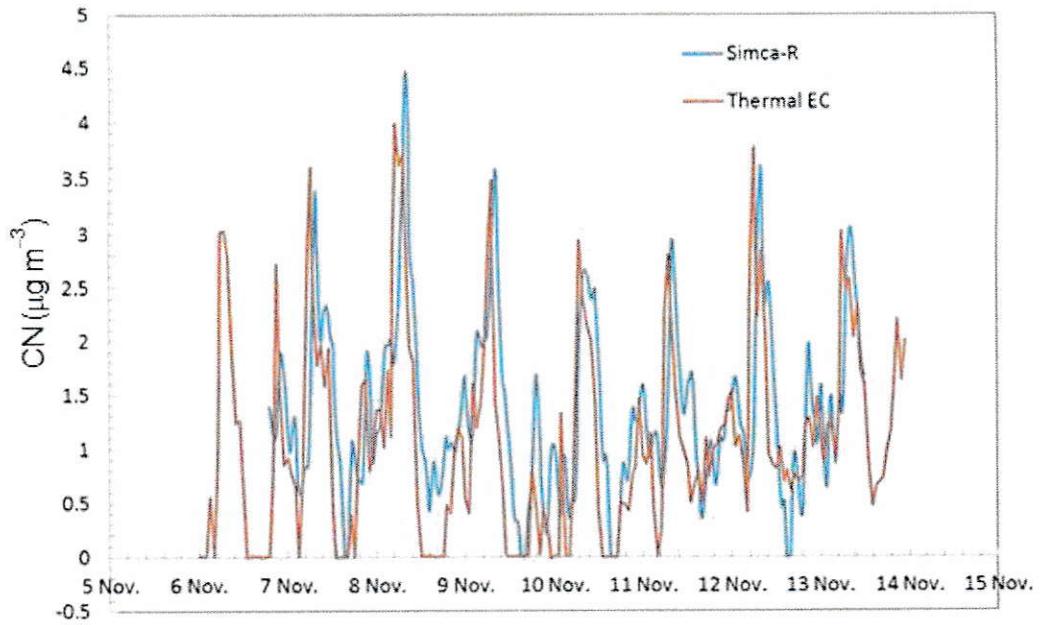
- SMADF. 2002. Inventario de Emisiones a la atmósfera. Zona Metropolitana del Valle de México, 2000. Secretaria del Medio Ambiente del Distrito Federal, México.
- Toro, R.A., Molares, R.G.E, Canales, M., Gonzalez-Rojas, C. y Leiva, M.A. 2014. Inhaled and inspired particulates in Metropolitan Santiago Chile exceed air quality standards. *Building and Environment* **79**: 115-123.
- Trier, A. y Horvath, H. 1989. Atmospheric extinction in Santiago de Chile. *J. Aerosol Science* **20**: 1197-1200.
- Ulriksen, P. 2004. Factores Meteorológicos de la Contaminación Atmosférica de Santiago. Contaminación Atmosférica de Santiago: Estado Actual y Soluciones. Santiago, Chile: Universidad de Chile, CONAMA-RM, Banco Santander.
- USACH. 2014. Informe Final. Estudio “Actualización y sistematización del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la Región Metropolitana”. Departamento de Física, Universidad de Santiago de Chile.
- USEPA, 2010. United States Environmental Protection Agency. “Report to Congress on Black Carbon”. Department of the Interior, Environment and Related Agencies Appropriations Act. <http://epa.gov/blackcarbon/>
- Westman, W. E. 1997. How much are nature’s services worth? Measuring the social benefits of ecosystem functioning is both controversial and illuminating. *Science* **197**: 960-4.
- Wang, Z., Zhang, H., Li, J., Jing, X. y Lu, P. 2013. Radiative forcing and climate response due to the presence of black carbon in cloud droplets. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* **118**(9): 3662-3675.
- Yasunari, T., Koster, R. D., Lau, W.K.M y Kim, K-M. 2015. Impact of snow darkening via dust, black carbon, and organic carbon on boreal spring climate in the Earth system: Dust+BC+OC SDE with NASA GEOS-5/GOSWIM. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* **120**(11): N/A-N/A.
- Zereini, F. y Wiseman, C.L.S. 2010. Urban Airborne Particulate Matter: Origin Chemistry, Fate, and Health Impacts. Springer, Heidelberg; New York.

## VI ANEXOS

### 6.1 Anexos de Materiales y Métodos

**Tabla 10** Datos del Censo 2012 en la ruta G-21 en el kilómetro 21. Camta: camionetas y camiones de 2 ejes; Camsre: camiones remolque; Varios: locomoción colectiva, motos, bicicletas y otros.

Región	Punto	Hora Censo	Autos	Camta	Camsre	Varios	Total
13	Corral Quemado	07-08	9	8	2	4	23
13	Corral Quemado	08-09	20	19	2	2	43
13	Corral Quemado	09-10	22	22	5	5	54
13	Corral Quemado	10-11	32	31	7	5	75
13	Corral Quemado	11-12	31	23	2	3	59
13	Corral Quemado	12-13	20	18	3	3	44
13	Corral Quemado	13-14	24	19	2	3	48
13	Corral Quemado	14-15	19	14	4	2	39
13	Corral Quemado	15-16	28	18	3	3	52
13	Corral Quemado	16-17	37	19	3	5	64
13	Corral Quemado	17-18	26	26	2	2	56
13	Corral Quemado	18-19	16	13	1	6	36



**Figura 36** Medición de la calibración para el SIMCA (R) comparándolo con el Sunset (Thermo EC).

## 6.2 Anexos Resultados y Discusión

### 6.2.1 Variabilidad espacial y temporal de los contaminantes

**Tabla 11** Resultados del Test de Bonferroni para los datos mensuales del MP<sub>2,5</sub> en Las Condes

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago
Feb	1,00	-	-	-	-	-	-	-
Mar	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-
Abr	$1,0 \cdot 10^{-14}$	$8,6 \cdot 10^{-11}$	$<2 \cdot 10^{-16}$	-	-	-	-	-
May	$<2 \cdot 10^{-16}$	$<2 \cdot 10^{-16}$	$<2 \cdot 10^{-16}$	-	-	-	-	-
Jun	$<2 \cdot 10^{-16}$	$<2 \cdot 10^{-16}$	$<2 \cdot 10^{-16}$	$<2 \cdot 10^{-16}$	$<2 \cdot 10^{-16}$	-	-	-
Jul	$<2 \cdot 10^{-16}$	$<2 \cdot 10^{-16}$	$<2 \cdot 10^{-16}$	$7,3 \cdot 10^{-16}$	$<2 \cdot 10^{-16}$	$<2 \cdot 10^{-16}$	-	-
Ago	1,00	1,00	1,00	$8,2 \cdot 10^{-6}$	$<2 \cdot 10^{-16}$	$<2 \cdot 10^{-16}$	$<2 \cdot 10^{-16}$	-
Dic	$2,3 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-8}$	0,0017	$<2 \cdot 10^{-16}$	$<2 \cdot 10^{-16}$	$<2 \cdot 10^{-16}$	$<2 \cdot 10^{-16}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$

**Tabla 12** Resultados del Test de Bonferroni para los datos mensuales del CN en Camino a Farellones

	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
Mar	1	-	-	-	-	-
Abr	1	1	-	-	-	-
May	0,246	0,196	1	-	-	-
Jul	1	1	1	0,116	-	-
Jul	0,023	0,015	0,912	1	0,01	-
Ago	$8,6 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$7,2 \cdot 10^{-7}$	$5,2 \cdot 10^{-7}$	$4,9 \cdot 10^{-10}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$

**Tabla 13** Resultados del Test de Bonferroni para los datos mensuales del MP<sub>2,5</sub> en La Parva

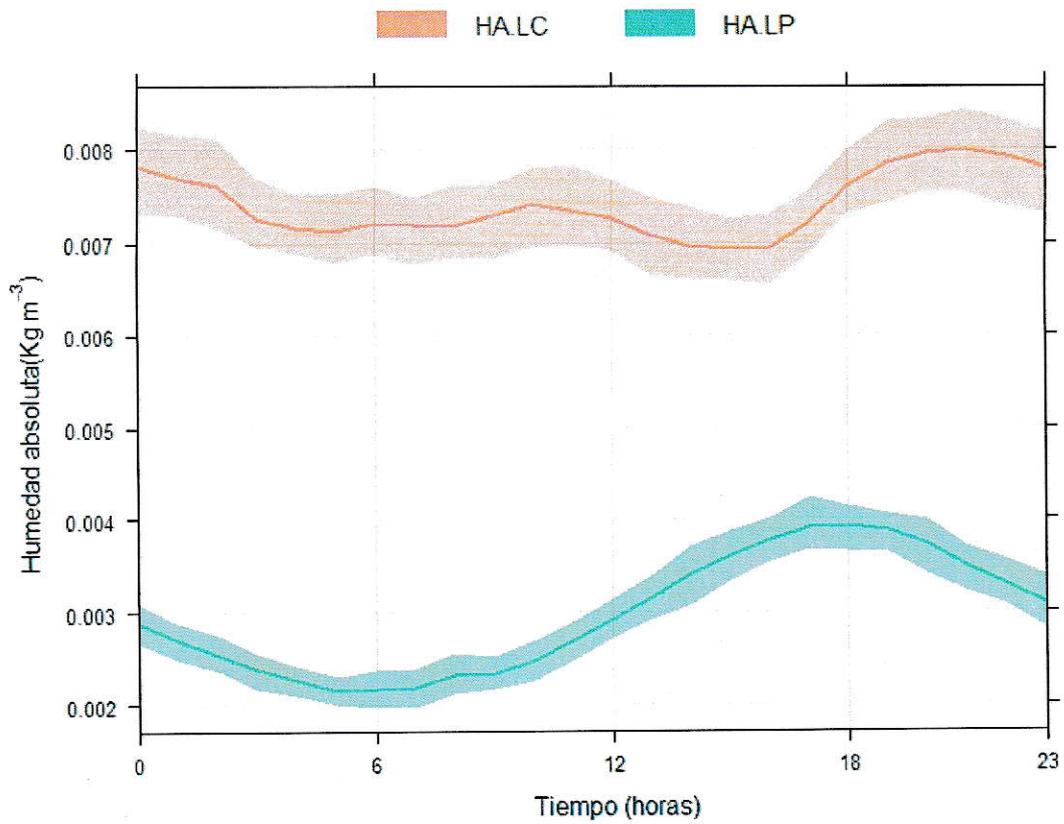
	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
Mar	0,00029	-	-	-	-	-
Abr	1,00	$2,6 \cdot 10^{-5}$	-	-	-	-
May	1,00	0,0118	0,23008	-	-	-
Jun	0,28557	0,65167	0,04034	1,00	-	-
Jul	$4,4 \cdot 10^{-13}$	1,00	$<2 \cdot 10^{-16}$	$<2 \cdot 10^{-16}$	0,00233	-
Ago	$<2 \cdot 10^{-16}$	0,01135	$<2 \cdot 10^{-16}$	$<2 \cdot 10^{-16}$	$5,4 \cdot 10^{-11}$	0,00083

**Tabla 14** Resultados del Test de Bonferroni para los datos mensuales del CN en La Parva

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jul	Ago
Feb	$1,9 \cdot 10^{-8}$	-	-	-	-	-	-
Mar	0,00067	1,00	-	-	-	-	-
Abr	$<2 \cdot 10^{-16}$	0,00369	0,0002	-	-	-	-
May	$<2 \cdot 10^{-16}$	$9,1 \cdot 10^{-13}$	$6,6 \cdot 10^{-14}$	0,00467	-	-	-
Jul	$<2 \cdot 10^{-16}$	$<2 \cdot 10^{-16}$	$<2 \cdot 10^{-16}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	0,06705	-	-
Ago	$<2 \cdot 10^{-16}$	$5,5 \cdot 10^{-13}$	$3,3 \cdot 10^{-14}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	0,08255	1,00	-
Dic	$1,9 \cdot 10^{-7}$	1,00	1,00	0,00125	$1,7 \cdot 10^{-13}$	$<2 \cdot 10^{-16}$	$1,9 \cdot 10^{-13}$

### 6.2.2 Variabilidad espacial y temporal de los datos meteorológicos

El comportamiento de la humedad relativa en LP se intenta explicar con el perfil diario de la temperatura en LP y la Figura 37, que es el perfil diario de la humedad absoluta. Al combinar el perfil diario de la temperatura y de la humedad absoluta es posible entender el perfil de la humedad relativa, ya que ésta depende de estos dos factores. En Las Condes la humedad absoluta no tiene una mayor variabilidad en el día, por lo que la humedad relativa se caracteriza mayormente por el perfil de la temperatura. En cambio en La Parva el perfil de la humedad absoluta tiene un gran pick en a las 18 horas, haciendo que el perfil de humedad relativa se desplace a estas horas.



**Figura 37** Variabilidad de los datos horarios de la humedad absoluta en LC y LP.