

**INFORME TÉCNICO DE ANTECEDENTES PARA DECLARAR
A LA REGIÓN METROPOLITANA
COMO ZONA SATURADA POR MP_{2,5}**

Santiago, Agosto 2014

VTA

Contenido

1. Introducción.....	3
1.1 Antecedentes Generales.....	3
1.2 Norma de MP _{2,5} : niveles normados y condiciones de superación.....	4
2. Descripción de las estaciones de monitoreo de MP _{2,5}	5
2.1 Estación Independencia.....	5
2.2 Estación La Florida.....	6
2.3 Estación Las Condes.....	6
2.4 Estación Pudahuel.....	6
2.5 Estación El Bosque.....	6
2.6 Estación Puente Alto.....	7
2.7 Estación Quilicura.....	7
3. Equipos de medición utilizados.....	8
3.1 Descripción de equipos utilizados.....	8
3.2 Frecuencia de medición y operación de los equipos.....	9
4. Evaluación de las normas de MP _{2,5}	10
4.1 Información de las estaciones de monitoreo.....	10
4.2 Análisis del cumplimiento de la norma de MP _{2,5}	11
5. Fuentes emisoras que generan MP _{2,5}	16
6. Delimitación del área geográfica.....	17
6.1 Antecedentes demográficos de la Región Metropolitana.....	17
6.2 Características geográficas de la Región Metropolitana.....	18
6.3 Antecedentes Meteorológicos.....	19
6.3.1 Características climáticas y meteorológicas de la zona.....	20
6.3.1.1 Temperatura.....	23
6.3.1.2 Velocidad y Dirección del Viento.....	29
6.3.1.3 Variabilidad del patrón de Precipitación.....	32
6.4 Condiciones meteorológicas que dan origen a episodios de contaminación.....	34
6.4.1 Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA).....	34
6.4.2 Fenómenos meteorológicos Tipo A y Tipo BPF.....	35
6.5 Alcances y límites de la zona a declarar saturada.....	37
7. Conclusiones.....	39
8. Anexos.....	41

1. Introducción

1.1 Antecedentes Generales

La Región Metropolitana comprende una población total de 6.683.852 (según Censo 2012, resultados provisorios) y una superficie de 15.554,5 km², donde el 85,7% corresponde a terrenos montañosos, 11% a superficie destinada a la agricultura y 3,3% a espacios urbanizados. Es una región mediterránea, que se ubica entre la Cordillera de los Andes y la de La Costa, en que predominan los relieves montañosos que encierran hacia el centro de la región una amplia y extensa cuenca aérea, la de Santiago. Por el norte, el cordón montañoso de Chacabuco la separa de la Región de Valparaíso, y por el sur, los cerros de Angostura y Chada (en Paine) constituyen el límite con la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Los cerros que rodean la planicie central imponen fuertes restricciones a la circulación de vientos y, por ende, a la renovación del aire al interior de la cuenca. Por ello, en épocas de estabilidad atmosférica los contaminantes quedan atrapados dentro de la cuenca que alberga a la ciudad de Santiago.

Las características meteorológicas de la Región Metropolitana son desfavorables para la remoción de contaminantes atmosféricos desde la cuenca, especialmente durante el período otoño-invierno. En este período, la variación de las concentraciones de contaminantes están determinadas, tanto por el desarrollo de la capa de mezcla y los flujos de viento local, como por los fenómenos de estabilidad del aire, especialmente durante la noche, donde se produce una fuerte disminución de la ventilación regional.

Los contaminantes atmosféricos son monitoreados en la Región Metropolitana mediante la Red de Monitoreo Automático de Contaminantes Atmosféricos y Meteorología (Red MACAM). Desde el año 1988 a la fecha, se ha realizado un monitoreo discreto de material particulado (MP) con equipos Dicotómicos, mediante filtros que permiten diferenciar la fracción gruesa (MP_{2,5-10}) de la fina (MP_{2,5}), en tres estaciones de la red: Independencia, Santiago, Las Condes. Por su parte, el MP_{2,5} se mide en tiempo real (monitoreo continuo) en la región desde el año 2000 a la fecha, en las distintas estaciones de monitoreo, pero sólo desde el año 2013 este monitoreo continuo se realiza con equipos con referencia EPA.

Dada la entrada en vigencia a partir del 1° de enero de 2012 de la Norma de Calidad Primaria para Material Particulado Fino Respirable MP_{2,5}, establecida mediante D.S. N°12 del 18 de enero del 2011, del Ministerio del Medio Ambiente (MMA), se ha verificado estado de la calidad del aire en relación al cumplimiento de esta norma en la Región Metropolitana, por lo cual este Ministerio hizo el envío de los datos de las estaciones de la Red MACAM calificadas como estaciones de monitoreo con representatividad poblacional (EMRP) a la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), a través de los Of. Ord. N°141548 y N°142553, el 24 de abril y el 8 de julio de 2014, respectivamente, con el fin de evaluar el cumplimiento de la norma para Material Particulado Fino Respirable MP_{2,5}, de acuerdo a lo establecido en el artículo 11° del D.S. N°12/2011 del MMA, en el

VTA

cual se indica, "...corresponderá a la Superintendencia del Medio Ambiente, fiscalizar el cumplimiento de las disposiciones del decreto y deberá informar anualmente acerca de los valores en que se sitúa la norma en las estaciones monitoras de la región respectiva, calificadas como EMRP durante los primeros tres meses de cada año, a las respectivas SEREMI del Medio Ambiente".

Para lo anterior, la SMA realizó una auditoría y análisis de los datos proporcionados por el MMA, esta auditoría dio por resultado el "Informe Técnico Cumplimiento de la Norma de Calidad del Aire por Material Particulado Fino Respirable MP_{2,5}" el cual fue entregado mediante Of. Ord. N°1089 el 14 de julio del 2014 de la SMA. (Ver Anexo 1)

1.2 Norma de MP_{2,5}: niveles normados y condiciones de superación

La norma Primaria de Calidad Ambiental para el Material Particulado Fino MP_{2,5}, se estableció a través del Decreto Supremo N°12 del 18 de enero de 2011, del Ministerio del Medio Ambiente y publicada en el Diario Oficial el 09 de mayo de 2011. Su entrada en vigencia fue a partir del 1° de enero de 2012.

Se han establecido los siguientes valores límites y condiciones para su evaluación:

Tabla N°1: Norma para MP_{2,5} y condiciones de superación.

Periodo y Contaminante	Métrica	Valor	Condiciones de superación
Diario MP _{2,5}	Promedio Aritmético de 24 horas	50 µg/m ³	Se considerará sobrepasada la norma diaria cuando el percentil 98 de los promedios diarios registrados durante un año, sea mayor a 50 µg/m ³ .
Anual MP _{2,5}	Promedio aritmético de los valores de concentración mensual en la estación monitora, en un año calendario	20 µg/m ³	Se considerará sobrepasada la norma anual cuando el promedio tri-anual de las concentraciones anuales sean mayor a 20 µg/m ³ .

Por otro lado, la norma define los siguientes niveles que originan situaciones de emergencia ambiental para el MP_{2,5}. Los niveles definidos son aquéllos en que la concentración de 24 horas se encuentre dentro de los rangos que da cuenta la siguiente tabla:

Tabla N°2: Niveles de Episodios MP_{2,5}

Nivel	Concentración 24 horas MP_{2,5} (µg/m³)
1. Alerta	80-109
2. Preemergencia	110-169
3. Emergencia	170- superior

Para efectos de este documento, sólo se evaluó el cumplimiento de la norma de 24 horas (norma diaria), de acuerdo al artículo 3 del D.S. N°12/2011 del MMA, puesto que no se cuenta con información suficiente, tres años continuos de mediciones, para evaluar la norma anual del MP_{2,5}.

2. Descripción de las estaciones de monitoreo de MP_{2,5}

La Región Metropolitana cuenta con 11 estaciones de monitoreo de calidad de aire, de las cuales solo 7 son Estaciones de Monitoreo con Representatividad Poblacional (EMRP) para Material Particulado Fino MP_{2,5} (Ver Anexos 2 al 8), bajo los requerimientos de la Res. Exenta N°106/2013 del 31 de enero del 2013 del Ministerio del Medio Ambiente y la Superintendencia del Medio Ambiente, la cual "Establece Criterios de Emplazamiento para Calificar Estaciones de Monitoreo de Material Particulado Fino MP_{2,5} como de Representatividad Poblacional y fija plazo para fines que indica", estas estaciones son: Independencia (EMF), La Florida (EML), Las Condes (EML), Pudahuel (EMO), El Bosque (EMQ), Puente Alto (EMS) y Quilicura (EMV), las cuales se describen a continuación:

2.1 Estación Independencia

Estación ubicada en Av. La Paz n° 850, comunas Independencia y Recoleta, en el interior del Instituto Psiquiátrico, Doctor José Horwitz Barak. El entorno de esta Estación es de tipo residencial de estrato socio-económico medio, con áreas verdes, sector de Hospitales y cementerios.

Esta estación se encuentra en operación desde el año 1997, con monitoreo de MP₁₀, CO, SO₂ y O₃, en el año 2008 se incorpora la medición de MP_{2,5} y en el año 2009 comienzan las mediciones de NOx. La estación cuenta además, con equipamiento meteorológico para medir parámetros tales como dirección y velocidad del viento, temperatura y humedad relativa.

VTA

2.2 Estación La Florida

Estación ubicada en Alonso de Ercilla n°1270, comunas La Florida, Macul y Peñalolén, al interior del Estadio La Florida, al lado de una cancha de patinaje, zona con alta densidad poblacional, sector residencial.

Esta estación se encuentra en operación desde el año 1997, con monitoreo de MP₁₀, CO, SO₂ y O₃, en el año 2000 se incorpora la medición de MP_{2,5} y en el año 2009 comienzan las mediciones de NOx. La estación cuenta además, con equipamiento meteorológico para medir parámetros tales como dirección y velocidad del viento, temperatura y humedad relativa.

2.3 Estación Las Condes

Estación ubicada en Av. Las Condes 11755, comunas Las Condes y Vitacura, al interior del Estadio Las Condes, al borde de la cancha de fútbol. Sector residencial, con edificaciones de mediano tamaño (no más de 10 pisos). Desde que fue instalada en 1996, se encuentra emplazada a un costado la Estación Histórica EMM1.

Esta estación se encuentra en operación desde el año 1997, con monitoreo de MP₁₀, CO, SO₂ y O₃, en el año 2000 se incorpora la medición de MP_{2,5} y NOx. La estación cuenta además, con equipamiento meteorológico para medir parámetros tales como dirección y velocidad del viento, temperatura y humedad relativa.

2.4 Estación Pudahuel

Estación ubicada en El Lazo 8667, comunas Pudahuel y lo Prado, al interior del Consultorio La Estrella. Sitio con modificaciones del entorno posterior a la fecha de instalación. Construcción de un Parque en Sitio eriazado cercano a la Estación (10 a 15 metros).

Esta estación se encuentra en operación desde el año 1997, con monitoreo de MP₁₀, CO, SO₂ y O₃, en el año 2000 se incorpora la medición de MP_{2,5} y NOx. La estación cuenta además, con equipamiento meteorológico para medir parámetros tales como dirección y velocidad del viento, temperatura y humedad relativa.

2.5 Estación El Bosque

Estación ubicada en Riquelme n° 155, comunas El Bosque, Lo Espejo y San Ramón, al interior del Centro de Educación de la comuna de El Bosque. Sector ha sufrido cambio en el entorno desde que fue instalada la estación.

Esta estación se encuentra en operación desde el año 1997, con monitoreo de MP₁₀, CO, SO₂ y O₃, en el año 2008 se incorpora la medición de MP_{2,5} y en el año 2009 comienzan las mediciones de NOx. La estación cuenta además, con equipamiento meteorológico para medir parámetros tales como dirección y velocidad del viento, temperatura y humedad relativa.

2.6 Estación Puente Alto

Estación ubicada en Av. Ejército Libertador S/N, comuna Puente Alto, en el Centro de Salud Familiar (CESFAM), entorno residencial, limita con plaza saludable, entorno ha sido modificado desde que fue instalada la estación.

Esta estación se encuentra en operación desde el año 2008, con monitoreo de MP_{10} y $MP_{2,5}$ y en el año 2009 se incorpora la medición de CO , NO_x , SO_2 y O_3 . La estación cuenta además, con equipamiento meteorológico para medir parámetros tales como dirección y velocidad del viento, temperatura y humedad relativa.

2.7 Estación Quilicura

Estación ubicada en Av. San Luis s/n (altura 300), comuna Quilicura, a un costado del estadio de la comuna, sitio eriazos, emplazada en un lugar con alto riesgo delictual. Existen fuentes de contaminación cercana a la estación que evidencian el uso de leña.

Esta estación se encuentra en operación desde el año 2008, con monitoreo de MP_{10} y $MP_{2,5}$ y en el año 2009 se incorpora la medición de CO , NO_x , SO_2 y O_3 . La estación cuenta además, con equipamiento meteorológico para medir parámetros tales como dirección y velocidad del viento, temperatura y humedad relativa.

A modo de referencia, la Tabla N°3 muestra la cantidad de habitantes y el % de población expuesta por cada estación de monitoreo.

Tabla N°3: Población expuesta por cada estación de monitoreo con representatividad poblacional.

Estación de monitoreo	Coordenadas (UTM) Datum WGS84, Huso 19 S	Población Expuesta (habitantes)	% Respecto a la población total R.M.
Independencia (EMF)	346488E 6300681N	87.787	1,3%
La Florida (EML)	352504E 6290304N	152.420	2,3%
Las Condes (EMM)	358305E 6305906N	41.556	0,6%
Pudahuel (EMO)	337311E 6298809N	307.499(*)	4,6%
El Bosque (EMQ)	345313E 6286825N	149.428	2,2%
Puente Alto (EMS)	352049E 6282013N	128.842	1,9%
Quilicura (EMV)	337356E 6306788N	82.378	1,2%

(*) Corresponde a población expuesta de Pudahuel y Cerro Navia.

Fuente: Censo de 2012, datos preliminares.

VTA

3. Equipos de medición utilizados

3.1 Descripción de equipos utilizados

De acuerdo al artículo 6 del DS N°12 del 18 de enero de 2011, del Ministerio del Medio Ambiente, *“...se deberán emplear instrumentos de medición de concentraciones ambientales de contaminantes atmosféricos incluidos en la lista de Métodos Denominados de Referencia y Equivalentes publicada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA), o que cuenten con certificación de alguna de las agencias de los países miembros de la Comunidad Europea, que implementan las directrices del Comité Europeo para Estandarizaciones o que cuenten con la certificación que dé cumplimiento a los estándares de calidad exigidos en el país de origen, entregada por algún ente acreditado por el gobierno de ese país”.*

La medición de MP_{2,5} se realiza mediante monitores continuos basados en el principio de atenuación Beta y TEOM (con FDMS), los cuales cuentan con el método equivalente EQPM-0308-170 y EQPM-0609-181, respectivamente, de la lista de Métodos Denominados de Referencia y Equivalentes publicada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA), desde el año 2013, según art. 6 del DS N°12 del 18 de enero de 2011, del Ministerio del Medio Ambiente.

En la Tabla N°4 se detallan, las fechas de inicio del monitoreo automático con instrumentos de medición con aprobación EPA, métodos de medición de MP_{2,5} de las 7 estaciones con EMRP y las resoluciones que otorga EMRP para MP_{2,5}.

Tabla N°4: Descripción de los equipos utilizados en las Estaciones de Monitoreo declaradas como EMRP por MP_{2,5}.

Estación de Monitoreo	Fecha de inicio del monitoreo continuo de MP_{2,5} con equipos con protocolo EPA	Método de Medición	Marca/Modelo	Método de Referencia o Equivalente EPA	Resoluciones que otorga EMRP para MP_{2,5}
Independencia (EMF)	05-07-2013	Monitoreo continuo, basado en el principio de Tapered Element Oscillating Microbalance (TEOM) con FDMS	Thermo/TEOM® 1400a Ambient Particulate Monitor 8500C FDMS	EQPM-0609-181	Resolución Exenta N°83 del 07 de febrero de 2014 de la Superintendencia del Medio Ambiente.

La Florida (EML)	20-08-2013	Monitoreo continuo, basado en el principio de atenuación beta	Met One/BAM1020	EQPM-0308-170	Resolución Exenta N°82 del 07 de febrero de 2014 de la Superintendencia del Medio Ambiente.
Las Condes (EMM)	05-09-2013	Monitoreo continuo, basado en el principio de atenuación beta	Met One/BAM1020	EQPM-0308-170	Resolución Exenta N°84 del 07 de febrero de 2014 de la Superintendencia del Medio Ambiente.
Pudahuel (EMO)	05-09-2013	Monitoreo continuo, basado en el principio de atenuación beta	Met One/BAM1020	EQPM-0308-170	Resolución Exenta N°88 del 07 de febrero de 2014 de la Superintendencia del Medio Ambiente.
El Bosque (EMQ)	26-09-2013	Monitoreo continuo, basado en el principio de atenuación beta	Met One/BAM1020	EQPM-0308-170	Resolución Exenta N°87 del 07 de febrero de 2014 de la Superintendencia del Medio Ambiente.
Puente Alto (EMS)	24-10-2013	Monitoreo continuo, basado en el principio de atenuación beta	Met One/BAM1020	EQPM-0308-170	Resolución Exenta N°85 del 07 de febrero de 2014 de la Superintendencia del Medio Ambiente.
Quilicura (EMV)	24-10-2013	Monitoreo continuo, basado en el principio de atenuación beta	Met One/BAM1020	EQPM-0308-170	Resolución Exenta N°86 del 07 de febrero de 2014 de la Superintendencia del Medio Ambiente.

Fuente: Elaboración propia en base a información de la Red MACAM.

3.2 Frecuencia de medición y operación de los equipos

La operación de los equipos es continua, y se realiza en concordancia con los requerimientos para la instalación, calibración y operación de los equipos de muestreo y análisis, según lo dispuesto en el Reglamento de Estaciones de Medición de Contaminantes Atmosféricos, establecido por el

VTA

Decreto Supremo N°61 del 19 de Noviembre del 2008, del Ministerio de Salud (en adelante D.S. N° 61/2008, del MINSAL).

Los datos son revisados diariamente por personal idóneo y dedicado exclusivamente para la validación y verificación de los datos. Las estaciones están conectadas en línea enviando los datos, cada 5 minutos, desde los *datalogger* al sistema de recolección de datos del Ministerio del Medio Ambiente. La validación de datos se realiza de acuerdo al D.S. N° 61/2008, del MINSAL.

La operación de las estaciones y validación de los datos, se realiza en el Departamento de Redes de la División de Calidad del Aire y Cambio Climático del Ministerio del Medio Ambiente, el cual cuenta con un Certificado de Acreditación de Laboratorio de Análisis, que fue otorgado por el "Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Pares de Québec, Canada", por un período de dos años. (Ver Anexo 9)

4. Evaluación de la norma de MP_{2,5}

4.1 Información de las estaciones de monitoreo

A pesar de que el monitoreo continuo para MP_{2,5} comenzó en el año 2000 para algunas estaciones, la data arrojada por las estaciones con EMRP que se analiza en el presente informe, es desde el 1 de enero al 31 de mayo del presente año, fecha en la cual se implementan los métodos de referencia EPA.

En base al monitoreo realizado, se presentan los siguientes resultados para el MP_{2,5} resumido en la Tabla N°5:

Tabla N°5: Evaluación de la norma diaria de MP_{2,5} para todas las estaciones con representatividad poblacional de la Red MACAM.

Estaciones	Independencia (EMF)	La Florida (EML)	Las Condes (EMM)	Pudahuel (EMO)	El Bosque (EMQ)	Puente Alto (EMS)	Quilicura (EMV)
Período de medición	1 enero al 31 de mayo del 2014	1 enero al 31 de mayo del 2014	1 enero al 31 de mayo del 2014	1 enero al 31 de mayo del 2014	1 enero al 31 de mayo del 2014	1 enero al 31 de mayo del 2014	1 enero al 31 de mayo del 2014
N° datos promedio 24 hr válidos	122	151	151	151	148	150	148
Porcentaje de datos promedio 24 hr válidos (%)	80.8	100	100	100	98	99.3	98

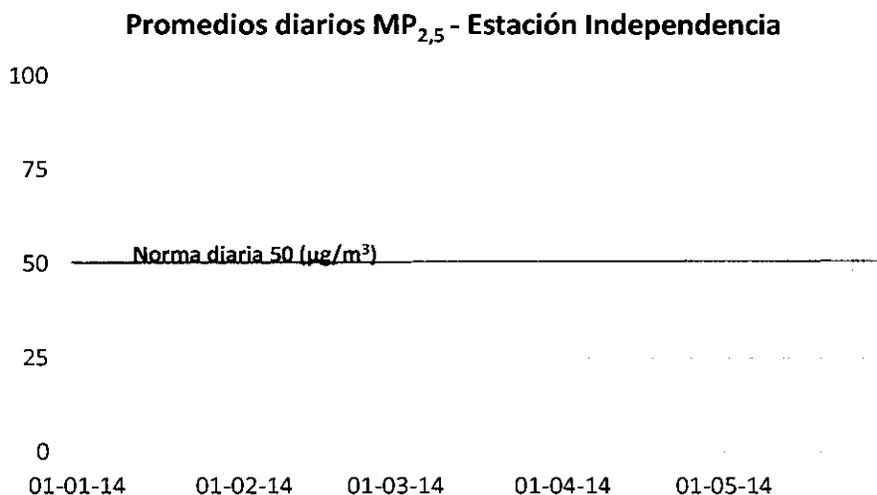
Meses en el año con promedio mensual válido	4	5	5	5	5	5	5
Días sobre la norma de 24 hrs (50 µg/m ³)	10	15	5	15	15	8	15

4.2 Análisis del cumplimiento de la norma de MP_{2,5}

De acuerdo al “Informe Técnico Cumplimiento de la Norma de Calidad del Aire por Material Particulado Fino Respirable MP_{2,5}”, entregado por la Superintendencia del Medio Ambiente al Ministerio del Medio Ambiente, se señala que las concentraciones diarias de MP_{2,5} para un año calendario, el cálculo del percentil 98 evaluado para los 365 días, permite un máximo de 7 excedencias, es decir días con superaciones al valor de 50 µg/m³ como concentración de 24 horas. De acuerdo al análisis efectuado por la SMA para el período comprendido entre el día 1° de enero de 2014 y el día 31 de mayo de 2014, se determina que el valor de la norma de MP_{2,5} como concentración de 24 horas es superada más de 7 veces por estación, en las 6 de las 7 estaciones de monitoreo calificadas como EMRP para MP_{2,5}, consideradas en el informe. De este modo, se concluye que antes de que termine el período anual de mediciones en las estaciones calificadas como EMRP por MP_{2,5}, 6 de las 7 estaciones analizadas superan la norma de MP_{2,5} como concentración de 24 horas. (Ver anexo 1)

En los siguientes gráficos se muestran los promedios diarios de las 7 estaciones calificadas como EMRP.

Gráfico N°1: Promedios diarios de MP_{2,5}, Estación Independencia.



VTA

Gráfico N°2: Promedios diarios de MP_{2,5}, Estación La Florida.

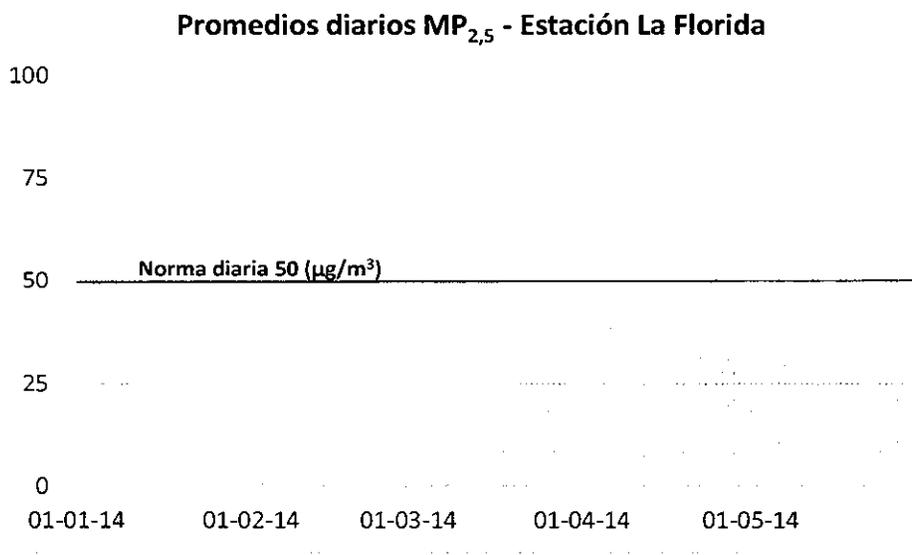


Gráfico N°3: Promedios diarios de MP_{2,5}, Estación Las Condes.

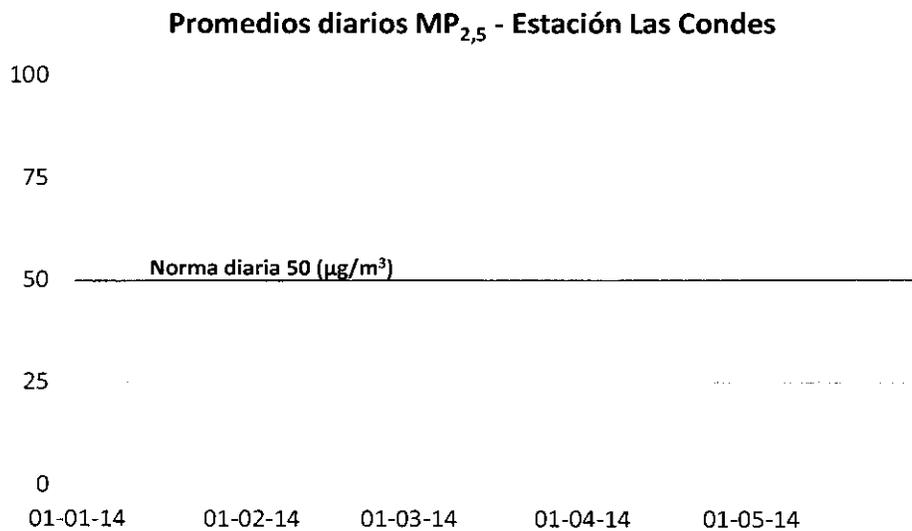
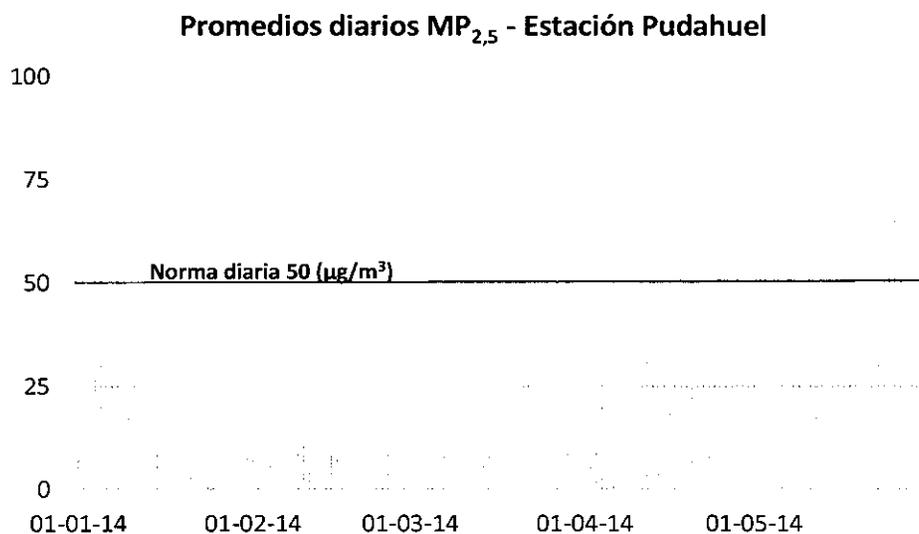
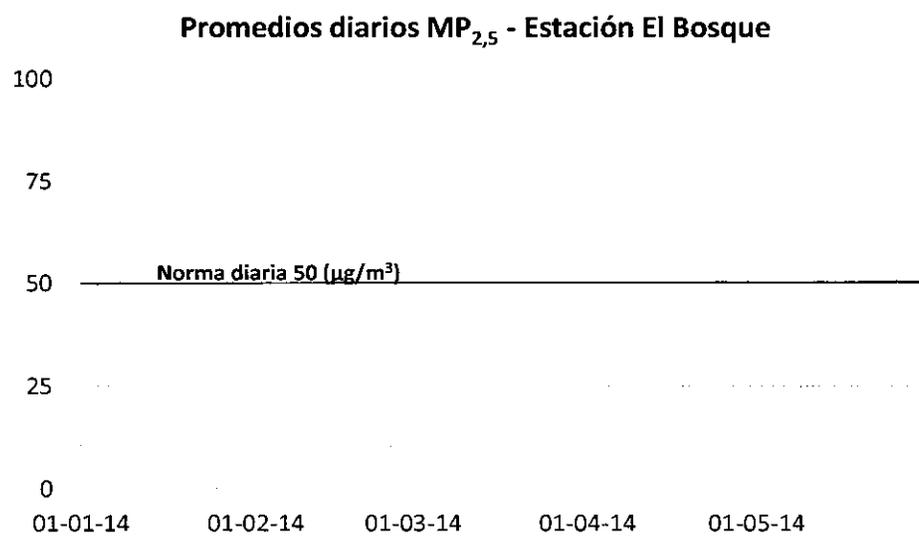


Gráfico N°4: Promedios diarios de MP_{2,5}, Estación Pudahuel.Gráfico N°5: Promedios diarios de MP_{2,5}, Estación El Bosque.

VTA

Gráfico N°6: Promedios diarios de MP_{2,5}, Estación Puente Alto.

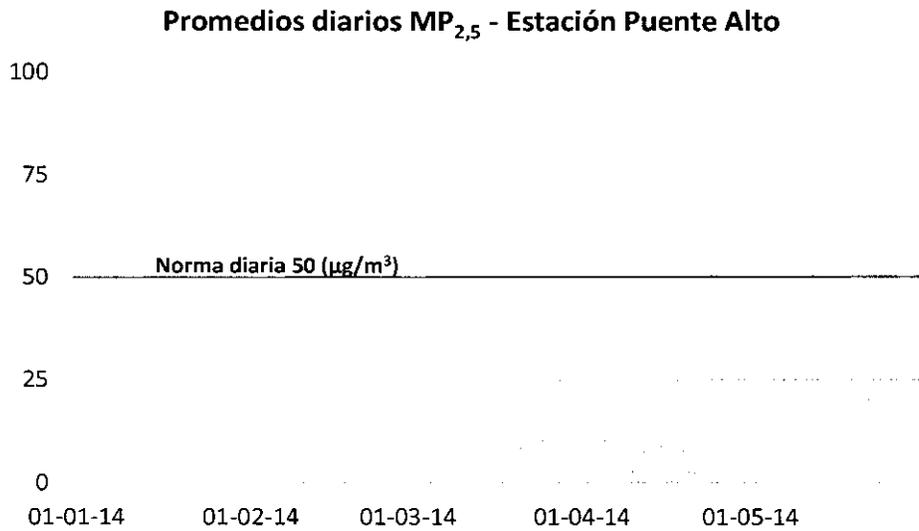
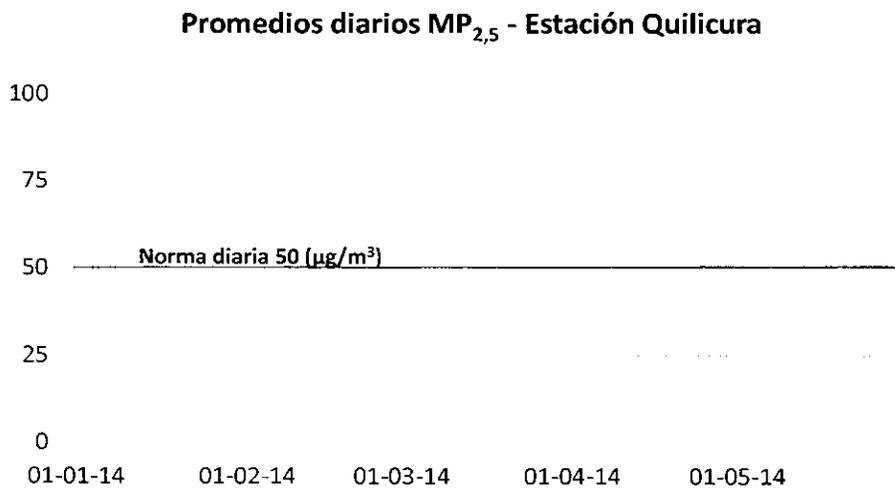


Gráfico N°7: Promedios diarios de MP_{2,5}, Estación Quilicura.



En la Tabla N°6 se presenta un resumen de los días de superación de la norma de 24 horas para MP_{2,5} para todas las estaciones calificadas como EMRP, en el período comprendido entre el 1 de enero al 31 de mayo del 2014.

Tabla N°6: Días de superación de norma 24 horas MP2,5.

Estación de Monitoreo	Días superación norma 24 horas MP2,5 50 (µg/m³)
Independencia (EMF)	10
La Florida (EML)	15
Las Condes (EMM)	5
Pudahuel (EMO)	15
El Bosque (EMQ)	15
Puente Alto (EMS)	8
Quilicura (EMV)	15

Referencialmente se efectuó un análisis de episodios críticos donde se determinó las emergencias ambientales, observándose un total de 6 concentraciones en el rango de alerta ambiental (80-109 µg/m³) en el período de análisis. Las estaciones que registraron mayor número de episodios corresponden a Pudahuel y El Bosque, como se muestra en el siguiente gráfico:

Gráfico N°8: Episodios de Emergencia Ambiental en las estaciones calificadas como EMRP.

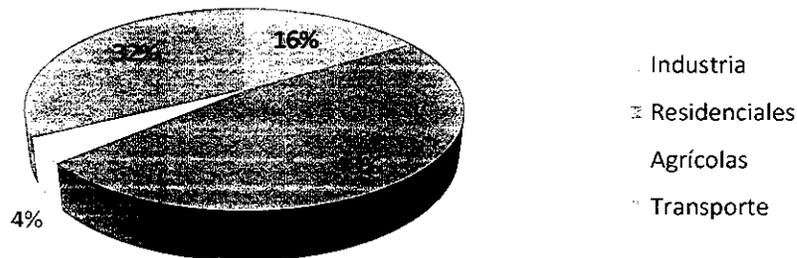


5. Fuentes emisoras que generan MP_{2,5}

Las principales fuentes emisoras de MP_{2,5} en la Región Metropolitana, corresponden a la combustión residencial de leña, seguida por las industrias, transporte y agrícolas, tal como se observa en la gráfica siguiente.

Gráfico N°8: Contribución a los niveles de MP_{2,5} según sector.

Contribución a los niveles de MP_{2,5} Inventario de Emisiones, USACH, Año base 2012



Fuente: Actualización y sistematización del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la Región Metropolitana, USACH 2014.

El total de emisiones de $MP_{2,5}$ generadas por el uso de leña como combustible en las viviendas de la Región Metropolitana, según la Actualización del Inventario de la RM realizado por la USACH, asciende a una cantidad estimada de 2149,24 Ton/año, y se estima que el total de hogares que usa leña y/o derivados para calefacción y/o cocina asciende a 117.097 unidades. En la Tabla N°7 se puede observar el tipo y número de artefactos utilizados en la Región Metropolitana.

Tabla N°7. Número por tipo de artefacto a leña en la Región Metropolitana.

Tipo de Artefacto	N° de artefactos en la Región Metropolitana
Salamandras	33.365
Estufas Simples	6562
Doble Cámara	67.238
Chimeneas	2322
Pellet	742
Otros	1212
Cocina	5656
Total	117.097

Fuente: Actualización y sistematización del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la Región Metropolitana, USACH 2014.

6. Delimitación del área geográfica

6.1 Antecedentes demográficos de la Región Metropolitana

La Región Metropolitana comprende una población total de 6.685.685 (según Censo 2012, resultados provisorios), el cual corresponde al 40,33% de los chilenos. Aun así, la Región registra una tasa de crecimiento que ha tendido a la baja. En el Censo 2012 fue de 1,01%, en el Censo 1992 fue de 1,48% y en el Censo 1992 fue de 1,92%. Con 52 comunas, la Región Metropolitana cuenta con una mayoría de zonas urbanas, de hecho sólo 18 son rurales.

La Tabla N°8 y N°9 da cuenta del crecimiento poblacional y de viviendas en los últimos 3 Censos.

Tabla N°8: Datos crecimiento poblacional 2002 a 2012, Región Metropolitana.

Población Residente	Censo 1992	Censo 2002	Censo 2012 preliminar	% Variación Intercensal (1992 y 2002)	% Variación Intercensal (2002 y 2012)
Región Metropolitana	5.220.732	6.045.532	6.683.852	15,8	10,6

Fuente: INE Resultados Preliminares Censo de Población y Vivienda 2012.

Tabla N°9: Número de aumento de viviendas del 2002 a 2012.

Número de viviendas	Viviendas Censo 1992	Viviendas Censo 2002	Viviendas Censo 2012	% Variación Intercensal (1992 y 2002)	% Variación Intercensal (2002 y 2012)
Región Metropolitana	1.286.486	1.643.892	2.096.962	27,8	27,6

Fuente: INE Resultados Preliminares Censo de Población y Vivienda 2012.

6.2 Características geográficas de la Región Metropolitana

La Región Metropolitana comprende una superficie de 15.554,5 km², donde el 85,7% corresponde a terrenos montañosos, 11% a superficie destinada a la agricultura y 3,3% a espacios urbanizados. Es una región mediterránea, que se ubica entre la Cordillera de los Andes y la de La Costa, en que predominan los relieves montañosos que encierran hacia el centro de la región una amplia y extensa cuenca aérea, la de Santiago. Por el norte, el cordón montañoso de Chacabuco la separa de la Región de Valparaíso, y por el sur, los cerros de Angostura y Chada (en Paine) constituyen el límite con la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

La cuenca de Santiago está limitada al oriente por los faldeos de la Cordillera de los Andes, con cerros que superan los 3.200 m.s.n.m. (Cerro Ramón). Por el oeste, la Cordillera de la Costa alcanza alturas sobre 2.000 m.s.n.m. (Cerros Roble Alto), siendo interrumpida por el Valle del Río Maipo, que abre la cuenca hacia el sector sudoeste. Más al sur, el macizo de Alhué (Cerro Cantillana) supera los 2.200 m de altitud.

Los cerros que rodean la planicie central imponen fuertes restricciones a la circulación de vientos y, por ende, a la renovación del aire al interior de la cuenca. Por ello, en épocas de estabilidad atmosférica los contaminantes quedan atrapados dentro de la cuenca que alberga a la ciudad de Santiago.

6.3 Antecedentes Meteorológicos

El objetivo del presente capítulo es describir el factor meteorológico de la Región Metropolitana desde su aspecto climatológico más general hasta las características locales asociadas a los fenómenos de contaminación atmosférica de la cuenca de Santiago. Se presentan los aspectos meteorológicos más relevantes de la región asociados a calidad del aire, introduciendo los fenómenos más importantes vinculados con los eventos de altas concentraciones como las configuraciones de tipo A y BPF.

Por su parte, el análisis de las condiciones meteorológicas de superficie, que tiene por objetivo definir las condiciones de transporte de contaminantes desde y hacia la ciudad de Santiago, fue ya descrito en el Capítulo 3 del Informe Técnico para la Declaración de Zona Saturada del año 1996¹. Con ello, se logró definir que el área de influencia de las masas de aire contaminado de la ciudad de Santiago abarca a toda la Región Metropolitana, dados los perfiles de viento (campos y trayectorias) observados y modelados.

En dicho estudio se trabajó con 2 metodologías de análisis. La primera (generación de campos de viento) estuvo basada únicamente en datos existentes a la fecha y definió los campos de viento medidos en la Región Metropolitana y, según ellos, se analizó cuantitativa y cualitativamente los transportes atmosféricos de superficie. El segundo método (modelamiento de campos y trayectorias de viento) consistió en un análisis de trayectorias de contaminantes realizado por medio de la aplicación del modelo Airviro, que a partir de la información medida de magnitud y dirección de viento en estaciones meteorológicas con períodos de medición común, construyó el campo de viento de toda la región. Esto permitió reproducir el potencial desplazamiento de las masas de aire (o de los contaminantes) a lo largo del día, partiendo desde cualquier punto de la región.

En dicho informe se entregó una descripción y análisis de los fenómenos de la contaminación asociados a los distintos fenómenos de transporte de masas de aire.

Desde la entrada en vigencia del Plan de Prevención y Descontaminación de la Región Metropolitana en el año 1998 a la fecha, estudios e investigaciones² han permitido identificar los

¹ Antecedentes para la Declaración de Zona Saturada de la Región Metropolitana, Comisión Nacional del Medio Ambiente región Metropolitana.

² Estudios e investigaciones:

1. Informe Oficial N°129/13 Sección Climatología, Subdepartamento de Climatología y Meteorológica Aplicada de la Dirección Meteorológica de Chile.
2. Estudio "Meteorología y Modelación de la Calidad del Aire en la Región Metropolitana", Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (2003).
3. Estudio "Evaluación y Propuesta de Rediseño para la Red de Monitoreo Automático de Calidad del Aire de la Región Metropolitana Red MACAM-2, CAPITULO III. DIAGNOSTICO OPERACIONAL Y RECOMENDACIONES AMBITO METEOROLOGIA desarrollado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, 2007.

VTA

patrones meteorológicos que modulan la capacidad de remoción del material particulado desde la cuenca. En especial, se han identificado los sistemas meteorológicos de escala sinóptica y los fenómenos de estabilidad local observados durante la ocurrencia de los episodios de contaminación. De este modo, se ha determinado la variabilidad estacional de las configuraciones meteorológicas típicas de la zona central de Chile y su influencia decisiva en la ocurrencia de episodios críticos de contaminación atmosférica por material particulado fino, que se dan principalmente durante el periodo otoño-invierno.

6.3.1 Características climáticas y meteorológicas de la zona

La Región Metropolitana se ubica en el valle interior de la Zona Central de Chile (33.5S y 70.7W), en la zona de transición geográfica de dos regímenes de circulación general de la atmósfera. Al Norte se encuentra con la zona de influencia del anticiclón subtropical del Pacífico suroriental y al Sur con el área dominada por el cinturón de los vientos del oeste, donde se alternan sistemas de altas y bajas presiones migratorias asociadas perturbaciones frontales. Éstas características asociadas al contraste latitudinal de la radiación solar durante el año, se traducen en una marcada estacionalidad del clima, con influencia de las altas presiones durante el periodo estival, generando veranos cálidos y secos en el valle central, mientras que en el periodo invernal, el desplazamiento hacia el Ecuador del anticiclón subtropical y del cinturón de los Oestes, posibilita el paso de perturbaciones frontales, generando la mayor parte de las precipitaciones en la zona central. El desarrollo y desplazamiento medio de estos sistemas, depende del paso de ondas (vaguadas y dorsales) en la tropósfera media y alta, cuya periodicidad observada es cuasi-semanal (escala sinóptica).

La principal característica de la Región Metropolitana, es la concentración de las precipitaciones en el invierno, entre los meses de mayo y agosto, con un 80% del total anual. También se observa una estación seca prolongada de 7 a 8 meses de duración. Una zona con estación seca más corta, de 4 a 5 meses, se observa solo en el sector cordillerano, sobre los 2.000 m.s.n.m.

Las cordilleras de la Costa y de los Andes, tienen importantes efectos climáticos en la Zona Central de Chile. Por su parte, la Cordillera de la Costa, con algunas cumbres superiores a 2.000 m.s.n.m. impide una mayor influencia marítima, excepto cuando el nivel de inversión térmica asciende sobre 1.000 m.s.n.m. Lo anterior, en asociación a vientos del Oeste en los niveles más bajos, que permiten el ingreso de nubosidad baja costera a través del valle del río Maipo. En general, esta situación meteorológica se asocia a la culminación de eventos de contaminación por material particulado fino en la cuenca de Santiago. Mientras que la Cordillera de los Andes, con una altura media de 4.500 m.s.n.m, perturba la circulación general de la atmósfera de la zona central produciendo frecuentemente el desarrollo de una baja presión, que genera condiciones de aumento de la temperatura y una disminución de la humedad relativa en la cuenca, fortaleciendo

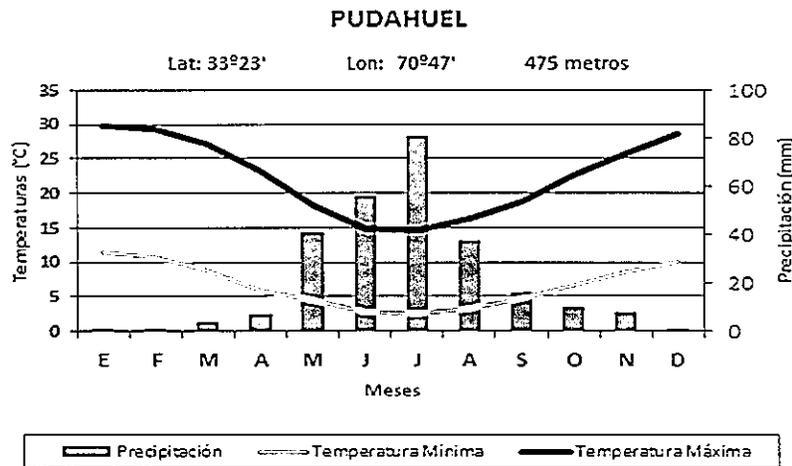
los fenómenos de inversión térmica y la estabilidad atmosférica, lo que inhibe la remoción de contaminantes.

La situación de continentalidad de la Región, hace que la humedad relativa sea baja, ligeramente superior al 70% como promedio anual. Además las amplitudes térmicas son altas, existiendo cerca de 13° C de diferencia entre el mes más cálido (enero) y el más frío (julio) y la diferencia media entre las máximas y mínimas diarias es de 14° C a 16° C. La dirección del viento predominante es del suroeste, siendo más persistente en el verano, con una intensidad media de 15 km/hr. En invierno predominan los vientos de tipo calma³.

Figura N°1: Climograma para Santiago, relación precipitación y temperatura mínima y máxima observada en la estación de Pudahuel, para el periodo climatológico 1960 – 1990.

PUDAHUEL
 Latitud: 33° 23' S Longitud: 70° 47' O Elevación: 475 m.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANO
T(°C)	20.2	19.1	16.7	13.1	10.0	7.7	7.3	8.6	10.6	13.6	16.6	19.2	13.6
Tx(°C)	29.8	29.4	27.1	23.2	18.3	14.9	14.7	16.4	18.7	22.2	25.8	28.6	22.4
Tn(°C)	11.4	10.8	8.9	6.0	4.6	2.7	2.5	3.4	4.7	6.7	8.6	10.4	6.7
HR(%)	57	62	67	73	80	84	84	82	79	72	63	58	72
RR(mm)	0.4	1.1	3.3	7.2	41.0	56.1	80.6	37.6	15.7	10.0	7.9	0.7	261.6



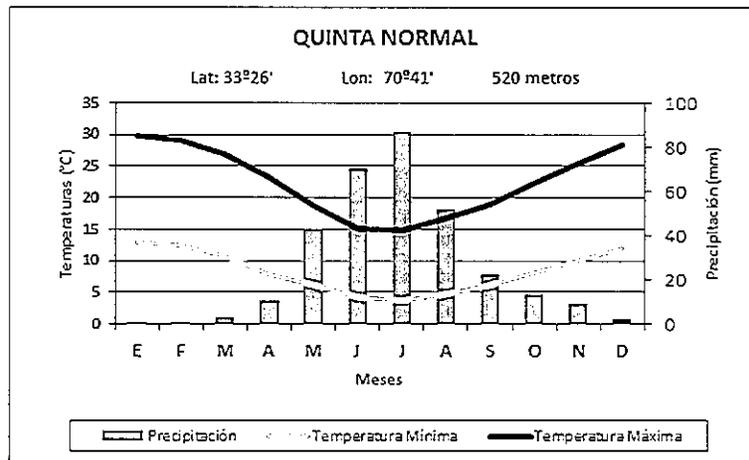
Fuente: Subdepartamento de Climatología y Meteorología Aplicada. Dirección Meteorológica de Chile

³ Los registros climatológicos de las estaciones de Pudahuel, Quinta Normal, Cerrillos, El Bosque, la Obra de Maipo, Central Queltehue y Longovilo muestran algunas características de este clima.

Figura N°2: Climograma para Santiago, relación precipitación y temperatura mínima y máxima observada en la estación de Quinta Normal, para el periodo climatológico 1960 – 1990.

QUINTA NORMAL
 Latitud: 33° 26' S Longitud: 70° 41' O Elevación: 520 m.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	AÑO
T(°C)	20.9	19.9	17.6	14.2	11.1	8.5	8.1	9.5	11.5	14.5	17.3	19.9	14.4
Tx(°C)	29.7	29.1	26.9	23.3	18.7	15.2	14.9	16.7	19.0	22.3	25.4	28.4	22.5
Tn(°C)	13.0	12.4	10.7	8.0	6.3	4.3	3.9	4.8	6.1	8.2	10.1	12.0	8.3
HR(%)	57	61	68	74	80	84	84	81	76	70	62	57	71
RR(mm)	0.4	0.8	3.2	10.4	42.2	70.4	86.6	51.8	22.0	13.4	9.2	2.1	312.5



Fuente: Subdepartamento de Climatología y Meteorología Aplicada. Dirección Meteorológica de Chile

En la Tabla N°10 se muestra la variabilidad de precipitación mensual durante los meses de invierno. Se aprecian fuertes disminuciones asociadas al total mensual de agua caída, debido a fluctuaciones atmosféricas de gran escala, como por ejemplo, la ocurrencia del fenómeno del Niño o La Niña.

Tabla N°10: Precipitación (mm) en Quinta Normal periodo 01 Abril - 17 Septiembre entre 1997 y 2013

	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre*
Normal	10,4	42,2	70,4	86,6	51,8	12,3*
1997	0,5	126,1	259,0	60,2	98,9	60,4
1998	32,7	13,8	22,6	0,2	0,6	3,5
1999	12,9	0,9	31,2	43,4	109,9	87,6
2000	17,6	20,0	261,5	28,5	0,5	105,8

2001	16,1	32,2	0,3	186,6	50,2	1,0
2002	13,6	137,9	247,5	92,3	74,2	28,3
2003	0,0	79,7	31,5	72,9	7,4	3,3
2004	39,2	10,4	44,1	95,2	55,9	23,7
2005	5,7	54,4	146,5	27,8	137,3	16,3
2006	2,9	7,3	79,8	130,0	50,3	0,0
2007	0,0	16,3	69,9	35,4	29,6	0,6
2008	7,5	109,8	51,0	34,7	130,8	3,4
2009	0,0	7,0	103,1	14,3	97,5	39,2
2010	0,3	65,8	75,6	26,6	6,9	28,4
2011	13,0	0,0	56,0	43,2	27,6	1,3
2012	9,6	34,0	69,7	2,0	35,8	1,0
2013	0	96	34,6	3,7	24,	2,9
*Normal y agua caída desde el 01 al 17 de Septiembre						

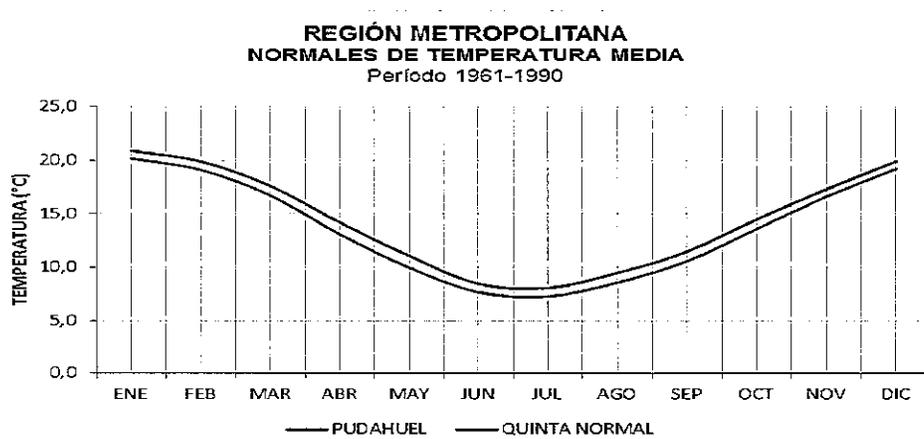
Fuente: Dirección Meteorológica de Chile, "Informe Final pronóstico meteorológica y de Calidad del Aire para Material Particulado, para la Región Metropolitana, período 2013"

6.3.1.1 Temperatura

En la figura N°3, se muestra la variación estacional de la temperatura media mensual en las estaciones de Pudahuel y Quinta Normal. Se observa que el periodo invernal presenta una marcada disminución debido a la menor disponibilidad de radiación solar debido al factor estacional y, por lo tanto, un enfriamiento de la atmósfera en la cuenca. Los flujos de los Oestes periódicamente generan flujos ascendentes en la Zona Central, lo que ayuda a fortalecer las inversiones de subsidencia, generadas durante el 70% de los días de invierno en la Zona Central, producto de la influencia del sistema de altas presiones.

VTA

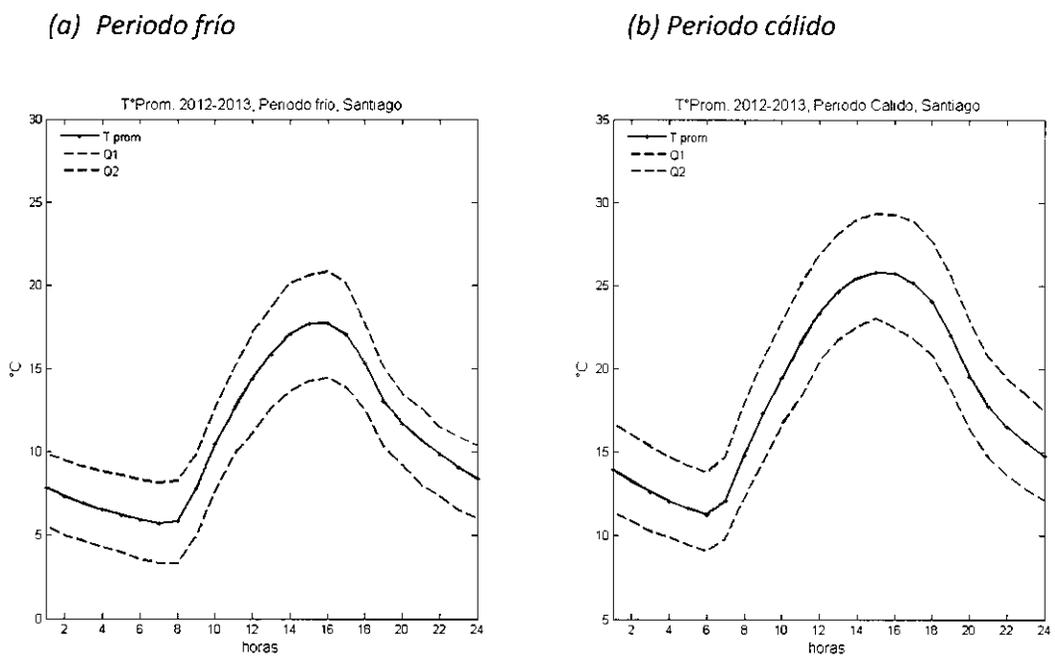
Figura N°3: Temperaturas mínimas y máximas medias normales para las estaciones de Pudahuel y Quinta Normal.



Fuente: Subdepartamento de Climatología y Meteorología Aplicada Dirección Meteorológica de Chile

En la red oficial de calidad del aire (Red MACAM-3) se realizan observaciones continuas de temperatura urbana durante todo el año. En la figura N°4 se observa el ciclo diario medio de la temperatura obtenida de dichas estaciones para el periodo 2012-2013. Se observa cómo los máximos y mínimos de temperatura varían fuertemente entre el periodo frío (abril - agosto) y el periodo cálido (septiembre-enero), respectivamente. Esta estacionalidad se traduce en periodos de alta estabilidad durante noche y la madrugada lo que afecta la capacidad de remoción de contaminantes desde la cuenca particularmente durante el periodo frío.

Figura N°4: Ciclos promedio diario de la temperatura para Santiago para el periodo 2009-2013. Estimación con datos meteorológico de la red MACAM.



Fuente: Elaboración propia con datos de equipos de monitoreo de la Red MACAM RM.
Ministerio del Medio Ambiente.

Durante el periodo 2013 se realizó un seguimiento diario de la altura de la capa de mezcla, específicamente en durante el periodo de abril a agosto con observaciones a las 12 Hora Local (HL) y 18 HL, cuyos promedios mensuales, máximos y mínimos se detallan la Tabla N°11 adjunta.

Tabla N°11: Altura de la capa de mezcla durante los períodos abril a agosto del 2013.

MES	ABRIL		MAYO		JUNIO		JULIO		AGOSTO	
ALTURA\HORA	12	18	12	18	12	18	12	18	12	18
PROMEDIO	695	740	560	670	479	524	361	390	460	470
MAXIMO	1100	1200	1000	1200	650	800	600	800	600	600
MINIMO	350	400	300	250	350	300	200	220	350	250

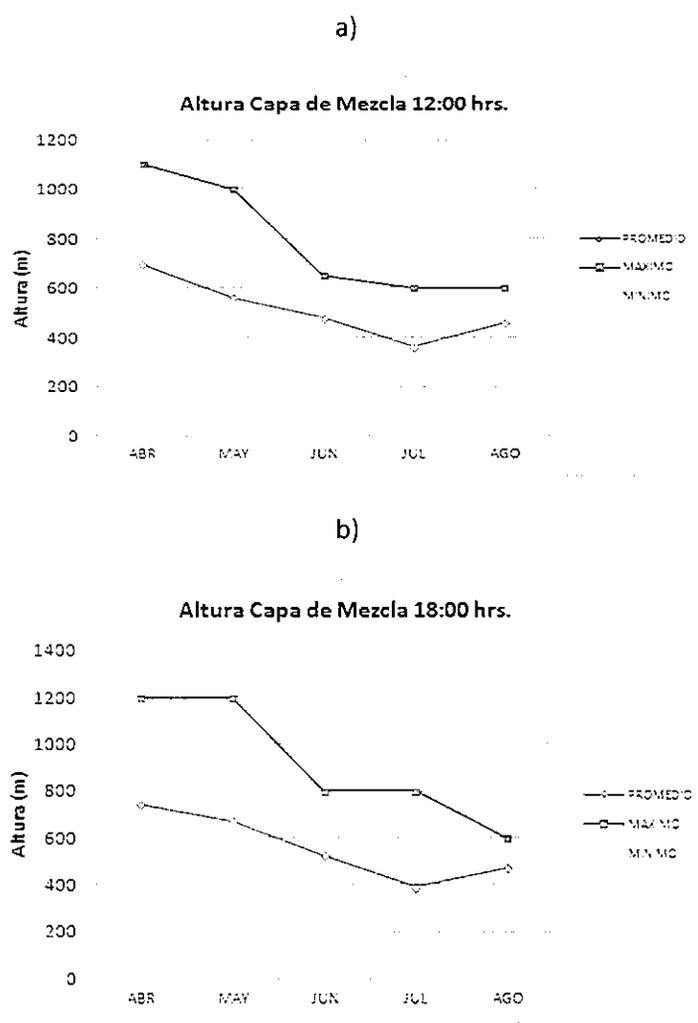
Fuente: Dirección Meteorológica de Chile, "Informe Final pronóstico meteorológica y de Calidad del Aire para Material Particulado, para la Región Metropolitana, periodo 2013"

Se observa que la altura de la capa de mezcla desciende durante el periodo otoño invierno mostrando los promedios más bajos durante el mes de julio, con valores del orden de ~361 m a las 12 HL horas y de 390 m a las 18 HL. En cuanto a los valores mínimos, estos también se registran

VTA

en julio, alcanzando valores de ~200 m y ~220 m para las 12 HL y 18 HL, respectivamente. Ver figuras 4.5.

Figura N°5: Altura promedio mensual, mínima y máxima de la capa de mezcla estimada sobre Santiago para las 12 y 18 HL, Estación Quinta Normal - DMC.



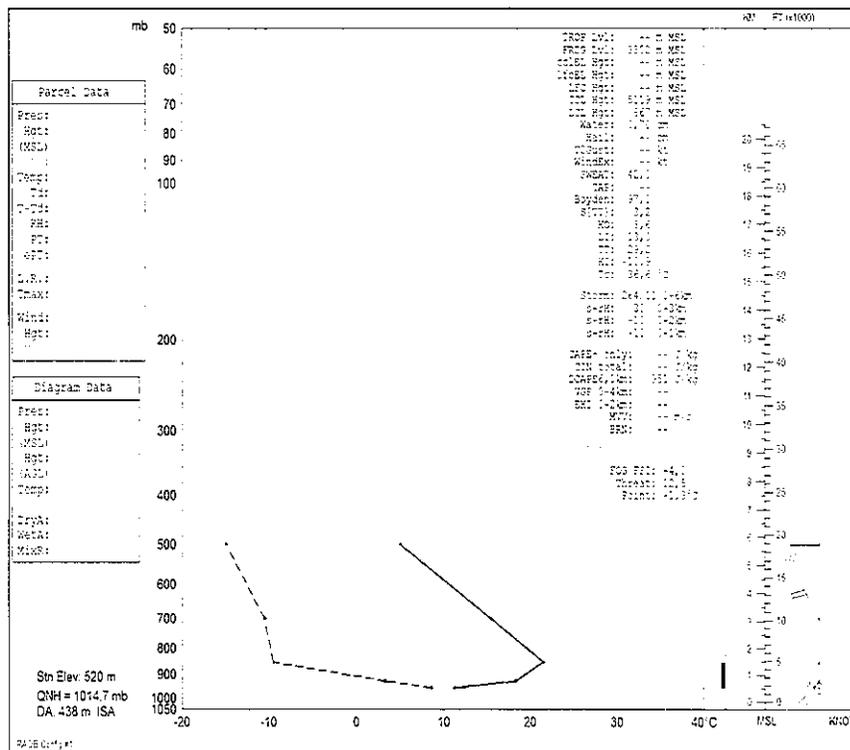
Fuente: Dirección Meteorológica de Chile, "Informe Final pronóstico meteorológica y de Calidad del Aire para Material Particulado, para la Región Metropolitana, período 2013"

La figura N°5, muestra el perfil medio de temperatura vertical en Santiago, para 27 radiosondeos desarrollados en condiciones de mala ventilación, durante el periodo otoño-invierno 2011-2012, en la estación de la Estación de Quinta Normal, para los años 2011 y 2012. Se observa que en toda la cuenca predomina en promedio una condición de alta estabilidad, con una inversión térmica superficial en las primeras decenas de metros, seguido de un espesor de características

isotérmicas. Lo anterior indica que la estabilidad de la cuenca es un factor importante en la evolución diaria de las concentraciones de contaminantes en superficie. En el diagrama se presenta el perfil medio hasta el nivel de 500hPa, a una altura cercana a los 5.000 msnm. La línea segmentada muestra la temperatura de condensación promedio de los días observados, indicando que la atmosfera local durante los días con altas concentraciones de contaminantes, se encuentra con una baja humedad relativa, lo que es consistente con las configuraciones sinópticas típicamente observadas.

Lo anterior indica que la estabilidad de la cuenca es un factor importante en la evolución diaria de las concentraciones de contaminantes en superficie. En el diagrama se presenta el perfil medio hasta el nivel de 500hPa, a una altura cercana a los 5.000 m.s.n.m. La línea segmentada muestra la temperatura de condensación promedio de los días observados, indicando que la atmosfera local durante los días con altas concentraciones de contaminantes, se encuentra con una baja humedad relativa, lo que es consistente con las configuraciones sinópticas típicamente observadas.

Figura N°6: Perfil vertical medio de temperatura en la cuenca de Santiago, periodo 2009-2011. Estimación Radiosondeos, Estación Quinta Normal - DMC.



VTA

Lo anterior confirma las observaciones desarrolladas en caracterizaciones preliminares de la estabilidad atmosférica mediante mediciones de temperatura a distintos niveles de altura sobre la cuenca de Santiago. Las observaciones más importantes derivadas de este tipo de monitoreo, son las siguientes:

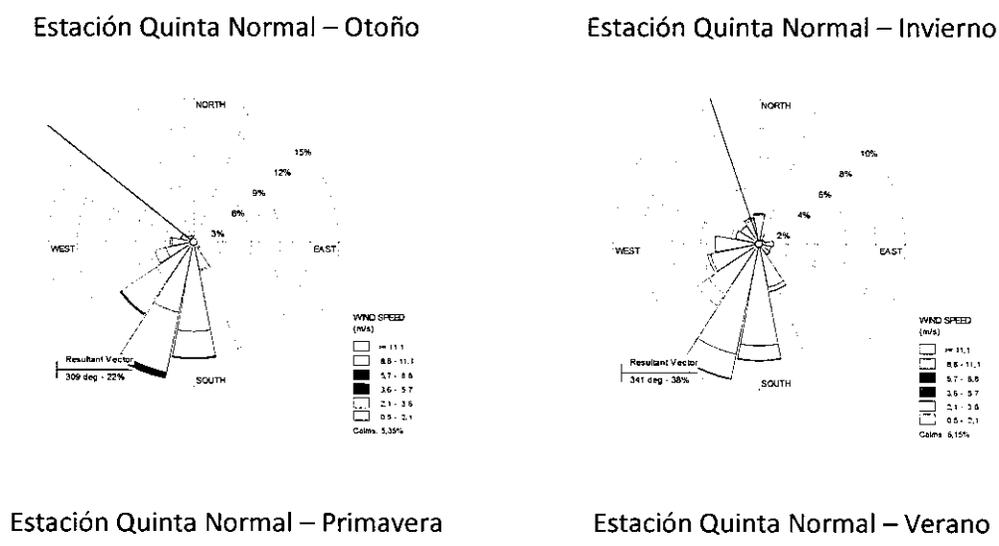
- Condiciones de estabilidad cerca de la superficie y en el seno de la cuenca: Las concentraciones máximas de material particulado se observan por la mañana y en horas de la tarde-noche, en asociación a las condiciones de estabilidad en las primeras decenas de metros sobre la superficie. **La estabilidad atmosférica en los primeros 500 msnm. también afecta las condiciones generales de calidad en el aire, debido a que controla parcialmente la estabilidad superficial y afecta el intercambio de la masa del aire de la cuenca a escala regional.**
- Evolución de la altura de la capa de mezcla diurna: El desarrollo diurno del **espesor de la capa de mezcla superficial afecta el grado de dilución vertical de los contaminantes en la cuenca.** La tasa de crecimiento de la capa de mezcla en la mañana es fundamental para controlar el máximo matinal de concentración de contaminantes. En la tarde, la máxima altura que puede alcanzar la capa de mezcla determina la magnitud de renovación que la masa de aire de la cuenca puede haber tenido durante el día.
- Flujo de viento superficial sobre la cuenca: Las concentraciones de contaminantes observadas, especialmente en el periodo nocturno, están altamente moduladas por la intensidad y dirección del viento cerca de la superficie. Una pendiente topográfica es suficiente para desarrollar flujos débiles nocturnos en superficie, suficientemente persistentes para producir renovación de la masa de aire local. Por otro lado, **el flujo de viento superficial diurno afecta directamente la ventilación del aire de la cuenca,** siendo más intenso y homogéneo que el flujo nocturno.
- Episodios de viento cálido del Este en altura e intrusión de aire costero: Para los procesos de **inicio y culminación de los periodos de estabilidad y aumento de las concentraciones de material particulado, existe una relación con las componentes del flujo de viento en la cuenca.** Investigaciones han determinado que la existencia de niveles altos de viento con componente del Este se asocian al aumento de la estabilidad en la cuenca de Santiago, siendo por lo tanto, de gran interés conocer la estructura de las componentes de viento y temperatura en la tropósfera baja. Se ha observado, que el mejoramiento de la ventilación en la cuenca se asocia al ingreso de aire costero desde el sector poniente de la región. Esta irrupción de aire costero se manifiesta en con la aparición de flujo zonal (Oeste Este), la variación de temperatura y aumento de la humedad del aire con ingreso de niebla o nubes bajas durante la noche.

6.3.1.2 Velocidad y Dirección del Viento

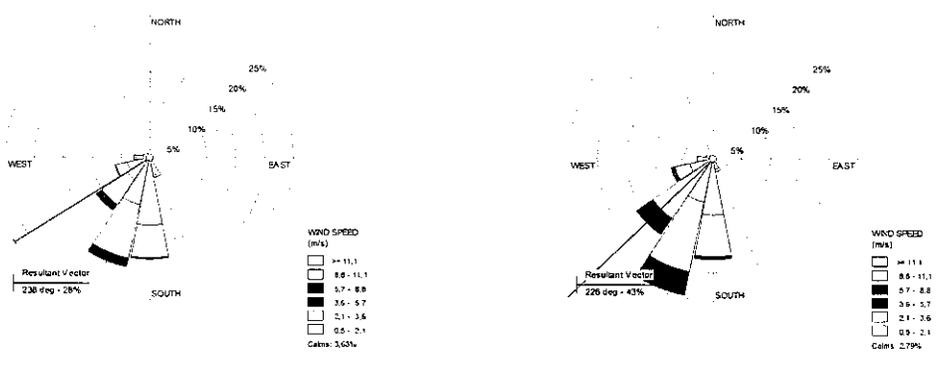
Tal como se indicó anteriormente, la concentración de material particulado fino, está influenciada por la intensidad y dirección del viento cerca de la superficie, especialmente durante el periodo nocturno, donde su magnitud es más bien baja. Existen zonas de la cuenca que presentan flujos nocturnos superficiales muy débiles y que presentan direcciones muy variables, lo cual disminuye el transporte de los contaminantes incidiendo en su acumulación. El flujo de viento superficial diurno es también importante por cuanto afecta directamente la ventilación del aire de la cuenca, siendo en general más intenso y homogéneo que el flujo nocturno.

En las figuras N°7 y N°8, se muestra la distribución media de la dirección y velocidad del viento para la estación de Quinta Normal y Pudahuel para las distintas estaciones del año. Los porcentajes asociados a los círculos concéntricos indican la frecuencia de ocurrencia de cada componente del viento. Mientras que las tramas de colores indican las intensidades del viento en m/s. En la Región Metropolitana, la dirección del viento predominante es del suroeste, siendo más persistente en el verano, con una intensidad media del orden de 4m/s (~ 15 km/hr). En invierno predominan los vientos calmos (~ 0 m/s).

Figura N°7: Comportamiento medio del Viento periodo 2007-2013. Estimación meteorológica Estación Quinta Normal- DMC



VTA

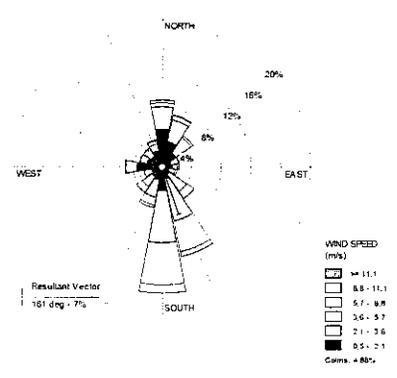
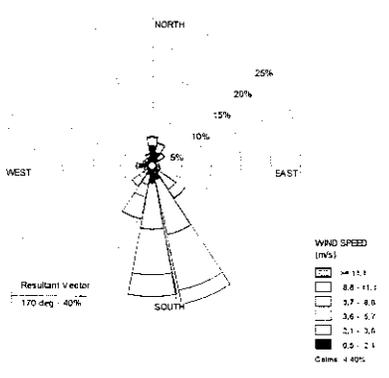


Fuente: Subdepartamento de Climatología y Meteorología Aplicada Dirección Meteorológica de Chile

Figura N°8: Comportamiento medio del Viento periodo 2007-2013. Estimación meteorológica estación de Pudahuel – DMC

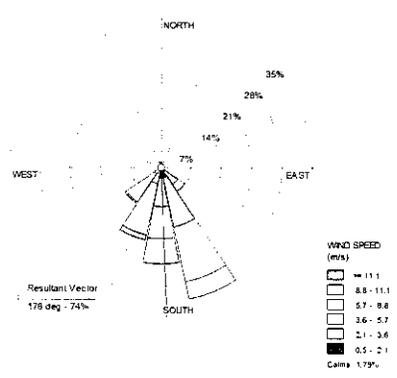
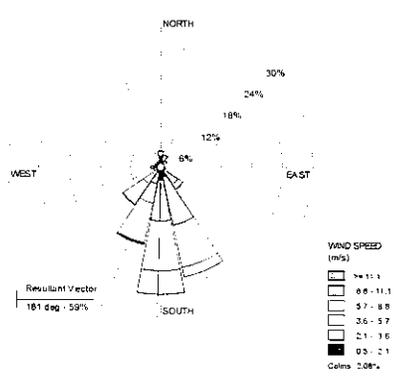
Estación Pudahuel - Otoño

Estación Pudahuel – Invierno



Estación Pudahuel - Primavera

Estación Pudahuel – Verano



Fuente: Subdepartamento de Climatología y Meteorología Aplicada Dirección Meteorológica de Chile

VTA

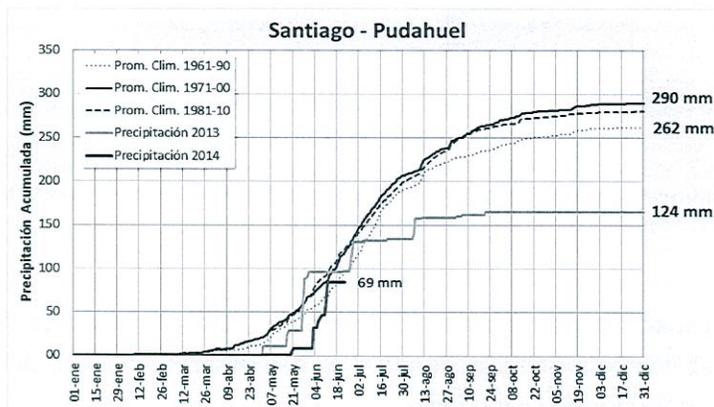
6.3.1.3. Variabilidad del patrón de Precipitación

La variabilidad interanual de las precipitaciones en Chile central, está asociado con la variabilidad del ciclo El Niño/Oscilación del Sur. Esta variabilidad muestra, en general, que la mayor frecuencia de ocurrencia de años lluviosos coincide con los años en los que se presenta el fenómeno de El Niño y la mayor frecuencia de años secos coincide con los años en que se presenta el fenómeno de La Niña. En consecuencia, el efecto de un año "Niño", se traduce en aumento de la actividad frontal durante la estación invernal en la región central y el desvío de las trayectorias de las bajas presiones más hacia al Norte de lo habitual, hasta la latitud 26°S, en asociación con un debilitamiento del sistema de altas presiones del Pacífico Sur. El efecto de la actividad del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur, influye notoriamente en el régimen de lluvias en Chile Central y Norte. El seguimiento de la Calidad del Aire durante los periodos de otoño invierno, se ven influenciados por la frecuencia de paso de sistemas frontales activos y débiles. En el caso de una alta frecuencia de sistemas activos, se puede observar periodos de inestabilidad que posibilitan el recambio de las masas de aire en la cuenca, llevando las concentraciones de MP_{2,5} a niveles bajos. Sin embargo, el paso de los sistemas débiles o estacionarios, puede generar fenómenos de estabilidad superficial en las horas previas al ingreso de la zona inestable del sistema, generando un aumento generalizado de las concentraciones de MP_{2,5} en toda el área metropolitana.

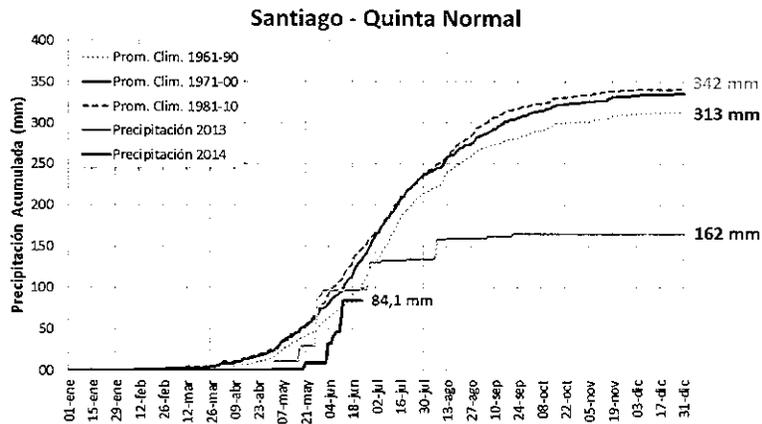
En la figura N°10 se presenta la precipitación acumulada, para el periodo 2012 y 2013 en las estaciones de Pudahuel, Quinta Normal y Tobaraba. Se observa que las precipitaciones para ambos periodos es de déficit respecto al valor climatológico de cada estación. En este caso el déficit se mantuvo durante todo el periodo otoño-invierno, cuando se presentaron las concentraciones más importantes de MP_{2,5}.

Figura N°10: Total de Precipitación acumulada para las estaciones de Pudahuel, Quinta Normal y Tobaraba

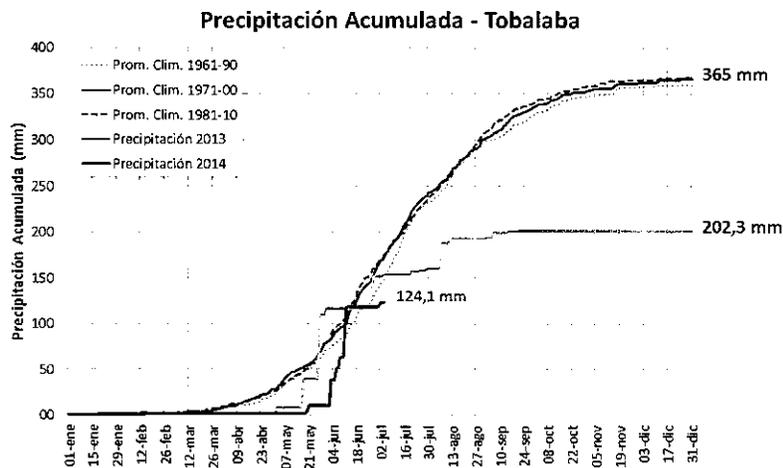
(a)



(b)



(c)



Fuente: Subdepartamento de Climatología y Meteorología Aplicada, Dirección Meteorológica de Chile.

Las mediciones ya realizadas, han permitido demostrar **que el factor meteorológico es decisivo en la ocurrencia de los episodios críticos por MP_{2,5} en la Región Metropolitana**. Por esta razón, una forma de realizar un seguimiento a las configuraciones meteorológicas de escala sinóptica que modulan el comportamiento medio de la atmósfera global en la cuenca regional y traducirlas en un indicador para el diagnóstico y pronóstico de días con mala ventilación es el Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA).

6.4 Condiciones meteorológicas que dan origen a episodios de contaminación

6.4.1 Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA)

Una tipificación del Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA) desarrollada durante cada periodo otoño invierno en la Región Metropolitana, indica una alta relación entre el número de episodios de $MP_{2,5}$ observados y las condiciones meteorológicas asociadas a mala ventilación (ver tabla N°12). Los días de mala ventilación se han cuantificado a partir de la escala de PMCA utilizada en la Gestión de Episodios Críticos (GEC) establecida en el D.S. N°66/2009.

Las categorías del PMCA están asociadas a los patrones meteorológicos de gran escala y de escala sinóptica de la zona central de Chile.

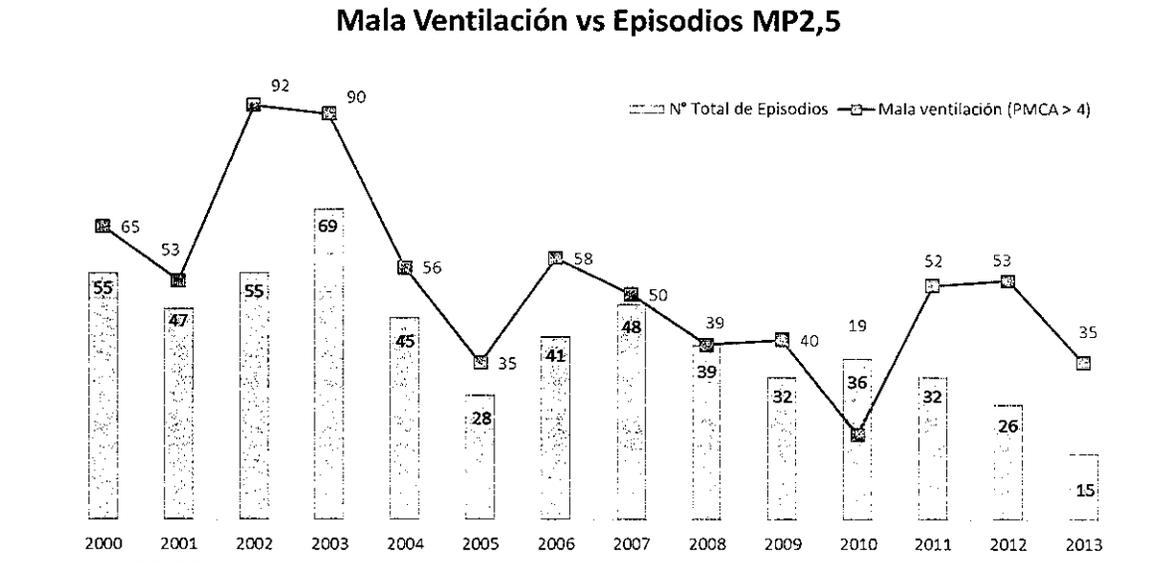
Tabla N°12 Clasificación del Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica para la Región Metropolitana.

Categoría del PMCA (denominación)	Condiciones de ventilación/dispersión de contaminantes	Características
1 Bajo	Muy buenas	<ul style="list-style-type: none">• Ausencia de inversión térmica de subsidencia.• Sistemas frontales activos• Marcada inestabilidad
2 Regular/bajo	Buenas	<ul style="list-style-type: none">• Inversión térmica de subsidencia débil y/o elevada.• Sistemas frontales de regular• Actividad o inestabilidad ligera• Advecciones generalizadas de aire húmedo y nubosidad baja.• Bajas segregadas o núcleos fríos.
3 Regular	Regulares	<ul style="list-style-type: none">• Predominio anticiclónico normal del período invernal• Ausencia de precipitaciones• Advecciones débiles de nubosidad baja al sector poniente de la cuenca.
4 Regular/Alto	Malas a críticas	<ul style="list-style-type: none">• Presencia de configuraciones tipo A o BPF.• Índice de circulación zonal medio o alto.
5 Alto	Críticas	<ul style="list-style-type: none">• Presencia de configuraciones tipo A o BPF.• Bajo índice de circulación zonal.

Fuente: "Pronóstico Meteorológico y de Calidad del Aire para de Material Particulado, Gestión de Episodios Críticos periodo 2010. Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA)"

En la figura N°11 se muestra una comparación entre el número de episodios críticos por MP_{2,5} en la Región Metropolitana y el número de días con mala ventilación, esto es, con un PMCA \geq 4, para el periodo 2000 – 2013.

Figura N°11 Mala Ventilación (PMCA \geq 4) y número de episodios de MP_{2,5}, observados en la Región Metropolitana durante el periodo otoño-invierno. Para los años 2000 al 2013.



Fuente: Elaboración propia con datos de equipos de monitoreo de la Red MACAM RM.

6.4.2 Fenómenos meteorológicos Tipo A y Tipo BPF

Diversos estudios desarrollados en la región, muestran como el factor meteorológico de la contaminación atmosférica se expresa a través del desarrollo de configuraciones de escala sinóptica que fortalecen eventos de alta estabilidad del aire en la zona central de Chile. En el periodo invernal, se han identificado dos tipos de configuraciones asociadas a malas condiciones de ventilación, denominadas tipo A y tipo BPF.

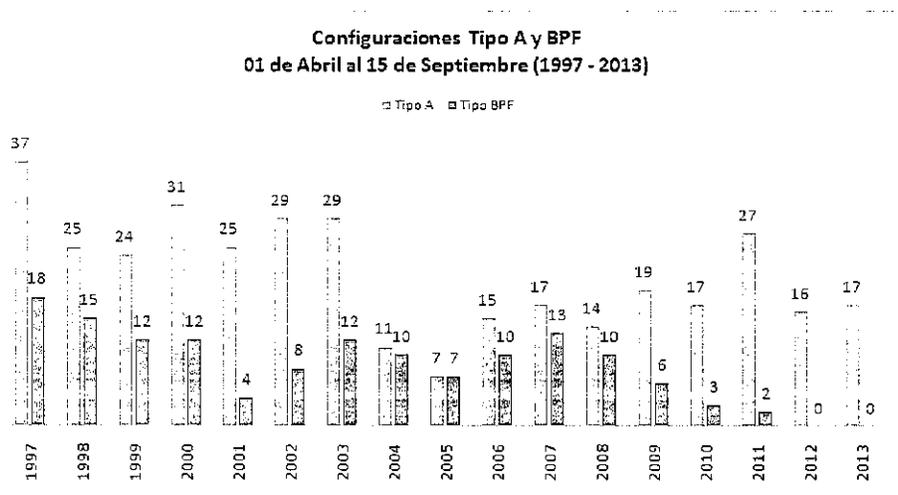
Las configuraciones de tipo A, denominadas así por tratarse de sistemas de altas presiones, tanto en altura como en superficie, generan situaciones de estabilidad debido al aporte de aire cálido desde la altura, lo que en presencia de una depresión costera (vaguada costera) intensifica el fenómeno de inversión térmica en la cuenca, limitando el desarrollo la capa de mezcla, generando el consiguiente aumento en la concentración de contaminantes. Este fenómeno se ha relacionado históricamente con la ocurrencia de episodios de Alerta y Preemergencias ambiental. Cabe indicar, que la culminación de la vaguada costera se asocia en general, al ingreso a la cuenca de aire

VTA

costero que posibilita la formación local de niebla y por consiguiente una disminución de las concentraciones de material particulado, dando por concluido el episodio de contaminación.

La configuración de tipo BPF, se manifiesta a través de la estabilización del aire en la cuenca debido a la aproximación de los sistemas frontales débiles a la zona central, que proyecta abundante nubosidad sobre la región, generando un aumento de las concentraciones de contaminantes en todas las estaciones de monitoreo. Este fenómeno generalmente concluye con precipitaciones asociadas al sistema frontal y al ingreso de una masa de aire frío que posibilita la remoción de los contaminantes de la cuenca. Se ha observado que la persistencia de sistemas frontales, en ocasiones sin precipitaciones, mantiene la inestabilidad, el movimiento de aire y por tanto la remoción de concentraciones de contaminantes. En la figura N°12 se aprecia la evolución de las configuraciones tipo A y BPF observadas en el periodo abril - agosto, desde el periodo 1997 hasta 2013.

Figura N°12: Evolución temporal del número de configuraciones clasificadas como A y BPF durante el periodo Otoño-invierno.



Fuente: Informe Final "Pronóstico Meteorológico y de Calidad del Aire para Material Particulado (MP10) Región Metropolitana de Santiago" periodo 2013

Si bien se reconoce que la variabilidad interanual de dichas configuraciones está asociada a fenómenos de mayor escala, el aumento de los episodios de contaminación atmosférica en la Región Metropolitana debido, por ejemplo, a fenómenos como El Niño o La Niña, no han sido estudiados en forma exhaustiva.

Las configuraciones meteorológicas tipo A y BPF se manifiestan cíclicamente, siendo a veces un episodio modulado por ambas configuraciones comenzando con una condición tipo A y finalizando con un BPF, lo que se ha llamado condición mixta.

Si bien los fenómenos meteorológicos a escala local deben ser estudiados detalladamente, se reconoce suficientemente bien la modulación generada por los patrones meteorológicos a escala sinóptica que predominan en la Zona Central de Chile, y que se caracterizan en el periodo otoño-invierno por las configuraciones tipo A, tipo BPF, y la condición mixta de ambas.

6.5 Alcances y límites de la zona a declarar saturada

Las condiciones meteorológicas y geográficas de la Zona Central de Chile son especialmente desfavorables para la dispersión de contaminantes, principalmente en otoño e invierno. En dichos periodos, se producen altas concentraciones de contaminantes primarios y secundarios en la ciudad de Santiago. Por su parte, estas condiciones son también favorables para la formación de smog fotoquímico durante gran parte del año, especialmente en primavera y verano.

Tanto el análisis de las mediciones meteorológicas disponibles, como la modelación de campos y trayectorias de viento, indican que existe intercambio de aire con los valles ubicados inmediatamente al Poniente y Surponiente de la ciudad de Santiago, es decir, los valles correspondientes a la cuenca del Estero Puangue, en los sectores de Curacaví y María Pinto, y del Estero La Higuera en el sector de Mallarauco. De esta misma forma se observa que existe ingreso de aire costero por la Cuenca del Río Maipo. Por lo tanto, se puede concluir que el área de influencia sobre la calidad del aire de la ciudad de Santiago al menos correspondería al área delimitada en el Norte y Noreste por medio del "Cordón de Chacabuco" y por el Este, hasta el límite natural impuesto por la Cordillera de los Andes. Por el Sur, se extiende al menos hasta el sector de Angostura de Paine, en el límite político de la Región Metropolitana. Los límites anteriores coinciden con los del valle de Santiago. Además, por el Oeste y Sudoeste, la zona de influencia comprende los valles de Curacaví, María Pinto, Mallarauco y Melipilla.

Las conclusiones anteriores son coincidentes con las recomendaciones dadas por J. Cassmassi, en el documento que se adjunta en el Anexo 10 del presente informe. De igual forma, son coincidentes con el concepto de cuencas de aire (Air Basin) utilizados por el Gobierno Norteamericano para la delimitación de zonas de control atmosférico. Éstas corresponden a zonas con condiciones meteorológicas y topográficas similares, las que permiten esperar que todo el aire de esas zonas se encuentre interrelacionado, como es el caso de los valles mencionados.

La información existente permite considerar a toda la Región Metropolitana como un área de influencia sobre la calidad del aire de Santiago y de Santiago sobre otras áreas. Por lo tanto, el Plan de Descontaminación que se desarrolle para mejorar la calidad del aire de la ciudad debe ser exigible a toda la región, y tal como se mostró en el estudio del año 1996, si bien el problema de contaminación atmosférica por algunos de los contaminantes primarios y secundarios tiene un

VTA

alcance local, el transporte de ellos por medio del desplazamiento de las masas de aire, afecta la calidad del aire de otras zonas más alejadas. Además, el problema del smog fotoquímico tiene participación tanto en escala urbana como regional. En este sentido, es necesario profundizar en el conocimiento de la meteorología de la Región Metropolitana y de sus regiones aledañas, dado que probable que sectores de estas últimas también sean parte del área de influencia de la ciudad de Santiago.

7. Conclusiones

- Del procesamiento y análisis de los datos del período evaluado, se calculó el número de excedencias a la norma en su nivel diario. Al comparar los datos medidos con el valor de la norma de 24 horas ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para $\text{MP}_{2,5}$, se observó el siguiente número de superaciones a la norma por estación:

Tabla N°13: Días de superación de norma 24 horas para $\text{MP}_{2,5}$, en el período comprendido entre el 1 de enero y el 31 de mayo del año 2014.

Estación de Monitoreo	Días superación norma 24 horas $\text{MP}_{2,5}$ ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$)
Independencia (EMF)	10
La Florida (EML)	15
Las Condes (EMM)	5
Pudahuel (EMO)	15
El Bosque (EMQ)	15
Puente Alto (EMS)	8
Quilicura (EMV)	15

- De acuerdo a lo anterior, durante el período analizado se superó el límite de la norma diaria de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en más de 7 días en 6 estaciones de monitoreo calificadas como EMRP por $\text{MP}_{2,5}$. Cabe señalar que al considerar mediciones continuas de $\text{MP}_{2,5}$ para un año, el cálculo del percentil 98 permite un número máximo de 7 días con excedencias. De este modo, se determina que antes de que concluya el período anual, 2014, de mediciones en las estaciones calificadas como EMRP por $\text{MP}_{2,5}$, el percentil 98 ya es superado.
- En vista de todos los antecedentes recopilados y presentados respecto de la superación de la norma de calidad primaria del aire para $\text{MP}_{2,5}$ y de los antecedentes respecto de la cobertura geográfica del desplazamiento de masas de aire en la cuenca de Santiago, el presente informe técnico concluye que la Región Metropolitana de Santiago deberá ser declarada como Zona Saturada para material particulado fino respirable $\text{MP}_{2,5}$.
- La Ley de Bases del Medio Ambiente N° 19.300 y sus modificaciones (Ley N° 20.417/2010), establecen en su Artículo 43, que la declaración de una zona del territorio como saturada o latente se hará por decreto supremo, y en su Artículo N° 44, que es obligatoria la implementación de un Plan de Prevención y/o Descontaminación, en las zonas calificadas

como latentes o saturadas. Es por esto, que aun cuando la Región Metropolitana cuenta con PPDA vigente, es altamente probable que las medidas para la descontaminación implementadas a la fecha, no puedan compensar el crecimiento futuro de la ciudad. Dado lo anterior, es imprescindible reformular el actual Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana (PPDA), incorporando el material particulado fino $MP_{2,5}$, con el fin de desarrollar e implementar medidas para la disminución de emisiones directas y de sus gases precursores.

- El declarar a la Región Metropolitana como una zona saturada por $MP_{2,5}$ permitirá tomar medidas más rigurosas para el control de la contaminación y así mejorar la calidad del aire, a razón que se daría un carácter de tipo legal al problema de la contaminación por este contaminante.