



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA**

**CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA TÉRMICA DE LA ATMÓSFERA  
EN LA CUENCA DE SANTIAGO Y SU RELACIÓN CON  
LA CALIDAD DEL AIRE**

**MARCELO JUAN CORRAL FUENTES**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN  
METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA**

PROFESOR GUÍA:  
RICARDO MUÑOZ MAGNINO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
RENÉ GARREAUD SALAZAR  
JOSÉ RUTLLANT COSTA  
MANUEL MERINO THAYER

SANTIAGO DE CHILE

2014

## Resumen

A partir de temperaturas del perfilador LapRass y de la torre meteorológica La Platina, se caracterizó la estructura térmica vertical sobre la cuenca de Santiago para el año 1999 y se relacionó con los episodios críticos de MP10 para los meses de abril y agosto. Los resultados muestran que las concentraciones horarias de MP10 son moduladas por una fuerte estratificación entre la superficie y los primeros 100 m, asociada a una inversión térmica nocturna que se intensifica al final de la noche. En altura se inicia un calentamiento entre los ~ 600 y 900 m mientras que en superficie se desarrolla un peak significativo de MP10 ( $> 400 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ) que decae paulatinamente durante la noche. Bajo esta condición, la estabilidad superficial ( $\Delta T_{8T2}$ ) alcanza un máximo promedio de  $\sim 3.5^\circ\text{C}$  al amanecer, que equivale a un incremento del 35% en la estabilidad media observada a esa hora durante el periodo de estudio. En todos los casos, durante la mañana siguiente al peak nocturno se observa un nuevo máximo horario de MP10, mientras que en altura prosigue el incremento de la temperatura que alcanza durante el día un máximo  $\sim 4^\circ\text{C}$  (30% sobre el promedio del periodo), siendo esto consistente con anomalías positivas de temperatura sobre los  $\sim 800$  m. Durante condiciones de Dorsal y Vaguada Costera el perfil de temperatura al final de la noche que sigue al máximo de MP10, se caracteriza por una inversión térmica de altura entre los 300 y 900 m, una condición isotermal entre 100 y 300 m y una marcada inversión superficial. Durante las condiciones PF el perfil vertical al final de la noche, se caracteriza por un perfil isotérmico entre  $\sim 530$  y 1000 m, una inversión térmica entre  $\sim 350$  y 530 m y una fuerte inversión superficial. Durante la noche siguiente el perfil de temperatura, en ambos casos, se caracteriza por una inversión térmica superficial intensa en los primeros 30 m, moderada hasta cerca de los  $\sim 150$  m y una atmósfera isotérmica en el resto del espesor. Respecto de las temperaturas superficiales registradas en las estaciones de calidad del aire, se observa que en promedio son  $\sim 2^\circ\text{C}$  mayor a la temperatura observada en La Platina, generado en ésta una mayor intensificación de la estabilidad superficial, lo que sería una característica propia de su emplazamiento. Un análisis de significancia estadística sobre los valores medios de temperatura de los perfiles observados durante las noches y mañanas más contaminadas, muestra que estos perfiles corresponden a una condición especial.

## **Agradecimientos**

Este trabajo fue posible gracias al apoyo de muchas personas, en particular de mi familia. Especiales agradecimientos al Sr. Ricardo Muñoz Magnino, profesor guía de este trabajo y apoyo permanente durante el desarrollo del programa, agradecimientos por su dedicación y comprensión. Agradecimientos a todos los profesores del programa de Magíster de quienes pude aprender lo fundamental y aún sigo aprendiendo. Agradecimientos al Sr. Manuel Merino Th., Meteorólogo del Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA) por facilitar gentilmente la información histórica del perfilador LapRass usada en este trabajo.

## TABLA DE CONTENIDO

Resumen

Agradecimientos

1. Presentación.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos.....	5
1.3. Descripción de la zona de Estudio.....	6
2. Revisión bibliográfica.....	10
2.1. Componente meteorológica de la contaminación atmosférica en Santiago.....	10
2.2. Contaminación urbana por Material Particulado en Santiago.....	19
3. Descripción de las bases de datos utilizadas.....	25
3.1. Perfiles verticales de Temperatura Virtual (LapRass).....	27
3.2. Series de temperatura Torre La Platina, Torre Entel y Estación Lo Prado.....	33
4. Resultados.....	39
4.1. Variabilidad de la temperatura en superficie y altura sobre Santiago.....	39
4.2. Estabilidad atmosférica en la columna vertical sobre La Platina.....	51
4.3. Concentraciones de MP10 en Santiago y episodios de contaminación 1999.....	62
4.4. Promedios condicionados según forzante sinóptica en episodios críticos.....	73
4.5. Promedios condicionados según peaks matinales y nocturnos de MP10.....	82
4.6. Análisis estadístico de la temperatura observadas en la vertical.....	98
5. Conclusiones y recomendaciones.....	101
5.1. Conclusiones.....	101
5.2. Recomendaciones.....	107
6. Bibliografía.....	111
7. Anexos.....	116

# 1. Presentación

## 1.1. Introducción

La Región Metropolitana de Santiago, ubicada en la región central de Chile, desde hace más de tres décadas presenta durante el periodo otoño e invierno, altas concentraciones de contaminantes urbanos, siendo de particular importancia la ocurrencia entre los meses de abril y agosto de cada año, de eventos críticos de contaminación por Material Particulado (fracción gruesa MP10 y fracción fina MP2,5)<sup>1</sup>. Estos episodios de contaminación se caracterizan por alcanzar en periodos breves de tiempo, peaks de concentraciones horarias del orden de 600 y hasta 700 ug/m<sup>3</sup>N, generando que la población del área metropolitana esté expuesta durante varias horas o varios días a una calidad del aire definida como “crítica” o “peligrosa”, según los índices de calidad del aire considerados en Chile<sup>2</sup>.

Un aspecto de gran interés, tanto público como privado, ha sido el esfuerzo por parte de las autoridades ambientales con apoyo del ámbito académico, en algunos casos, de desarrollar e implementar sistemas de pronóstico de calidad del aire para MP10, durante la última década, y para MP2,5 a partir del año 2011<sup>3</sup>. Lo anterior, con el objetivo de prever la ocurrencia de dichos episodios críticos y aplicar medidas de prevención o mitigación de las emisiones de contaminantes.

Desde el punto de vista puramente meteorológico, la caracterización de algunos patrones sinópticos y sub-sinópticos, así como la evaluación técnica de las metodologías de pronóstico para MP y la implementación de modelos numéricos de alta resolución por parte de

---

<sup>1</sup> Las observaciones de Material Particulado en Santiago indican que la fracción respirable, varía significativamente durante el invierno debido principalmente al incremento de las concentraciones de la fracción fina MP2,5 (Usach 2006).

<sup>2</sup> Ver norma de calidad del aire primarias para MP10 y MP2,5, D.S.N°59/98 Minseges y D.S.N°12/2011 Ministerio del Medio Ambiente, respectivamente.

<sup>3</sup> Actividades que se enmarcan en el Plan Oficial para enfrentar episodios de contaminación, mientras se diseñan medidas de orden estructural en la región para disminuir las emisiones de contaminantes. Ver D.S N°66/2010 que aprueba el Plan de Prevención y Descontaminación para la Región Metropolitana.

investigadores nacionales<sup>4</sup>, han permitido importantes avances en el estudio del factor meteorológico asociado a los problemas de contaminación de Santiago, permitiendo el diseño e implementación de redes de monitoreo para el seguimiento específico de sistemas meteorológicos que han evidenciado tener efectos importantes en la ocurrencia de los eventos críticos antes señalados.

En este contexto, es de gran relevancia el estudio de la estabilidad vertical de la atmósfera para la comprensión de las condiciones de mala ventilación observadas durante la ocurrencia de los episodios críticos, en especial su variabilidad en las capas bajas donde afecta directamente, por ejemplo, las características de la capa límite atmosférica donde son emitidos dichos contaminantes. Para caracterizar la estabilidad atmosférica es necesario contar con perfiles verticales de temperatura, los que pueden ser obtenidos a través de distintas técnicas de observación, por ejemplo, en campañas de radiosondeos, uso de globos cautivos o de perfiladores verticales de temperatura como es el caso de las observaciones utilizadas en el presente trabajo.

Es importante indicar que las observaciones de altura mediante radiosondeo a nivel nacional son escasas debido principalmente a los costos operacionales asociados, que alcanzan valores del orden de ~ US\$ 250 por cada lanzamiento<sup>5</sup>. El único radiosondeo operacional que existe en la zona central de Chile se desarrolla en la estación costera de Santo Domingo<sup>6</sup> a unos ~ 100 km de Santiago, sin embargo, comparaciones preliminares de estos perfiles verticales de temperatura y observaciones obtenidas en campañas de radiosondeos desarrolladas en Santiago, muestran diferencias notables en sus valores medios y variabilidad inter-diaria, especialmente en los primeros 500 m sobre el suelo (Muñoz y Corral 2011).

En el caso de Santiago, no existen observaciones meteorológicas regulares para el perfil vertical de temperatura, por lo que se han desarrollado caracterizaciones preliminares de la

---

<sup>4</sup> Ver por ejemplo, Rutllant (1973; 1981; 1983; 84), Rutllant y Fuenzalida (1987); Ulriksen P. et al (1992); Rutllant y Garreaud (2006); Muñoz R. (2003; 2010; 2012); Gallardo L. (2006) y Schmitz R. et al (2011), entre otros.

<sup>5</sup> Estimación en base a los costos de las campañas de radiosondeos desarrolladas como apoyo al pronóstico de calidad del aire, periodo 2011-2012, convenio de cooperación técnica entre el Ministerio del Medio Ambiente y la Dirección Meteorológica de Chile.

<sup>6</sup> La Dirección Meteorológica de Chile, mantiene el lanzamiento operacional de al menos un radiosondeo diario (12 UTC) en el Aeródromo de Santo Domingo (33° 39' S y 71° 36' W, a 75 msnm).

estabilidad atmosférica de la cuenca a partir del análisis de información histórica de temperatura observada en estaciones ubicada a distintos niveles (ver Muñoz, 2003).

Un esfuerzo histórico se realizó entre los años 1997 y 2000 tras la instalación y operación de un perfilador vertical tipo LapRass instalado en la estación agrometeorológica de La Platina en la zona Sur de Santiago (comuna de la Pintana), lo que posibilitó la observación de perfiles verticales de temperatura con resolución horaria. Sin embargo, las reiteradas fallas técnicas y prolongados períodos sin información, además de la falta de financiamiento, hicieron que se descontinuara su operación, siendo la información obtenida única en su tipo.

Solo a partir del año 2009 y en el marco de actividades conjuntas entre el Ministerio del Medio Ambiente y la Dirección Meteorológica de Chile, se han realizado lanzamientos de radiosondas desde la estación Quinta Normal, durante el periodo invernal y solo cuando se ha previsto que las condiciones meteorológicas pueden desarrollar condiciones de mala ventilación.

Cabe mencionar que otros esfuerzos en desarrollar monitoreo de altura de diversas variables han sido realizados, por ejemplo, a partir del año 2007 por investigadores de la Universidad de Chile con la entrada en operación de un Nefobasímetro<sup>7</sup>, y a partir del periodo 2011, por el Ministerio del Medio Ambiente y la Dirección Meteorológica de Chile a través de la implementación en un equipo LIDAR<sup>8</sup>.

En el presente trabajo se realiza una caracterización de la estructura térmica vertical de la atmósfera de Santiago y su relación con fenómenos de contaminación atmosférica por Material Particulado MP10 durante el periodo 1999. Lo anterior, a partir del análisis de perfiles horarios de temperatura virtual generados por el equipo perfilador vertical LapRass, que operó en la zona Sur de Santiago. Se incorpora además información de temperatura en los primeros metros de la superficie aportada por una torre meteorológica de 24 m, la que junto a otras estaciones instaladas, por ejemplo, en cerros que circundan el área urbana de Santiago, como

---

<sup>7</sup> A partir del año 2007, el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile puso en marcha con fines académicos un Nefobadimetro, ubicado en la Facultad de Ciencia Física y Matemáticas de dicha universidad en la zona centro de Santiago. El equipo entrega información de la base de nubes y datos de retrodispersión que se han utilizado para estimar, por ejemplo, la altura de la capa de mezcla diurna sobre Santiago (Muñoz y Undurraga, 2010).

<sup>8</sup> En el marco de implementación de una red meteorológica para Calidad del Aire, la Dirección Meteorológica de Chile, adquirió y puso en operación un equipo LIDAR (Light Detection and Ranging), a través del cual se han desarrollado observaciones de perfiles verticales de concentraciones de aerosoles durante episodios de contaminación (ver Muñoz R. y Alcañaz R. 2011).

la estación de Lo Prado, han permitido registrar datos de temperatura a distintos niveles y con ello un seguimiento básico de los fenómenos de estabilidad de la cuenca.

El periodo de análisis comprende el año 1999, que mostró ser el más completo y representativo en función de los objetivos de este trabajo. De este modo, caracterizar la atmósfera local de la cuenca de Santiago, particularmente el perfil vertical de temperatura entre superficie y los 1000 m, así como caracterizar la estabilidad superficial y de otros niveles, y su asociación con la variabilidad de las concentraciones de Material Particulado se presenta como el objetivo principal de este trabajo.

Los principales rasgos del factor geográfico y climatológico de la cuenca de Santiago, así como una descripción sucinta de los fenómenos sinópticos y de escala superficial asociados a episodios de contaminación por Material Particulado, se presentan en el capítulo 2. El capítulo 3 describe la elección y tratamiento de los datos utilizados, la metodología de trabajo y antecedentes técnicos sobre los equipos de monitoreo considerados. Los resultados obtenidos y el análisis desarrollado, se presentan en el capítulo 4, mientras que en el capítulo 5 se desarrolla la discusión y las conclusiones del análisis realizado y finalmente las sugerencias y recomendaciones.



## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Caracterizar la estructura térmica vertical de la atmósfera sobre la cuenca de Santiago y establecer su relación con los fenómenos meteorológicos de escala sinóptica, su efecto en la meteorología de superficie y su impacto en las concentraciones de Material Particulado.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

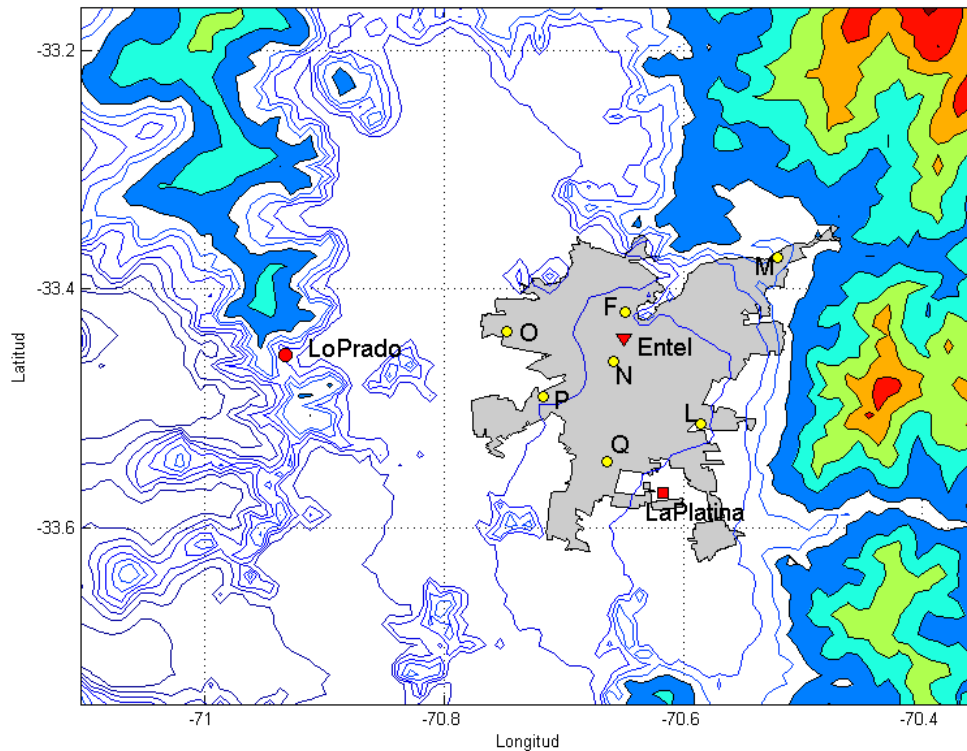
- Caracterizar la estructura térmica vertical sobre Santiago a partir de las observaciones obtenidas desde el equipo LapRass y de la Torre de La Platina.
- Establecer y cuantificar la relación entre perfiles de temperatura del LapRass y La Platina, con los datos de Material Particulado observados en la Red de Monitoreo oficial de la cuenca de Santiago.
- Identificar las posibles relaciones existentes entre la estabilidad superficial y en distintos niveles de la columna atmosférica, y las condiciones meteorológicas observadas durante la ocurrencia de episodios críticos de contaminación.

### **1.3. Descripción de la zona de Estudio**

La zona de estudio comprende la cuenca de Santiago ubicada entre a los 33,5° de latitud S y los 70,8° de longitud W, en el valle longitudinal o depresión intermedia en Chile Central a unos ~ 100 km de la costa y a una altura media de ~ 550 m sobre el nivel del mar. En el seno del valle se emplaza la ciudad de Santiago, cuya área geográfica urbana se conoce como el Gran Santiago Metropolitano (figura 1.1), que concentra 37 de las 52 comunas de la región con una extensión territorial del orden de ~ 71.000 hectáreas y cerca de ~ 4.700.000 habitantes lo que representa el 89% de la población regional y cerca del 40% de la población nacional (Minvu 2008).

#### **1.3.1. Aspectos geográficos de la región de estudio**

En esta latitud el valle central adquiere forma de llanura con una longitud N-S del orden de los 80 km, limitada por el cordón montañoso transversal de Chacabuco al Norte y por la Angostura de Paine por el Sur. De esta forma, el valle de unos 35 km de longitud W-E, queda confinado por la Cordillera de la Costa al W con alturas del orden de ~2.000 m sobre el nivel del mar (msnm), mientras que al Este limita con la Cordillera de los Andes, con alturas medias del orden de ~ 2.000 msnm en el Pieandino y superiores a los 5.500 msnm en la Cordillera propiamente tal. El valle presenta una suave pendiente SW-NE del orden de ~ 1% con alturas del orden de ~ 700 msnm, en el sector de Puente Alto y Apoquindo al SE y NE, desde donde el terreno se deprime en todas direcciones dejando las zonas bajas y llanas hacia el W y SW con alturas del orden de ~ 450 msnm en Pudahuel al W y 350 msnm al SW, esta última la más baja en la cuenca del río Maipo en el sector de Talagante. En el valle se observan algunos cerros islas que caracterizan el territorio, destacando el Cerro San Cristóbal de 380 m (880 msnm) al NE que se prolonga hasta unirse al cordón Manquehue de (1.500 msnm), el Cerro Renca de 420 m (905 msnm) al NW de la ciudad antes de salir del radio urbano, el Cerro Chena de 480 m (950 msnm) al SW y los Cerros de Lo Aguirre al poniente de hasta 900 msnm, que pertenecen a extensiones de la cordillera de la costa cuyo cordón es interrumpido al SW por el sistema fluvial por donde drena el río Maipo.



**Figura N°1.1.** Mapa topográfico de la cuenca de Santiago en la zona central de Chile. En gris el área urbana del Gran Santiago, estaciones oficiales de calidad del aire (puntos amarillos), estaciones de monitoreo meteorológicas usadas en este trabajo (color rojo).

### 1.3.2. Aspectos climatológicos de la región en estudio

Existe consenso en que las características geográficas y climatológicas de la cuenca de Santiago durante el periodo otoño-invierno, generan condiciones desfavorables para la remoción del Material Particulado, debido a la modificación que el relieve regional y la superficie continental generan sobre la circulación de gran escala (Garreaud y Rutllant, 2006). La zona central de Chile se encuentra bajo la influencia semipermanente del anticiclón subtropical del Pacífico Suroriental, modulando el clima de la cuenca de Santiago, que se clasifica como “templado-cálido, con estación seca prolongada” (Fuenzalida, 1971, en Garreaud, 1995). La estación seca se prolonga entre 7 a 8 meses en la zona de valles, y entre 4 a 5 meses en el sector cordillerano, con lluvias invernales que concentran cerca del 80% de las precipitaciones anuales entre los meses de mayo y agosto. La precipitación aumenta de poniente a oriente por efecto de la Cordillera de la Costa que genera una sombra pluviométrica, observándose precipitaciones anuales de 262 mm en Pudahuel (Aeropuerto), 312.5mm en Santiago (Quinta Normal) y 347.2 mm en el Aeródromo de Tobalaba al Oriente (Anuario meteorológico 1999, Dirección Meteorológica de Chile).

Durante el año 1999, la Región Metropolitana de Santiago se caracterizó por presentar durante el primer semestre, influencias de un evento La Niña que persistía desde fines del periodo 1998 y que dejó para dicho año, un déficit pluviométrico en Santiago con un total anual de 98.6 mm de agua caída. Bajo la condición climatológica de evento La Niña o fase fría de ENOS<sup>9</sup>, se reconoce la intensificación del Anticiclón Subtropical del Pacífico Suroriental que extiende su zona de influencia generando una disminución de la frecuencia de sistemas frontales que afectan la zona central, generando impacto directo en las precipitaciones invernales (Montecinos y Aceituno, 2003).

El Boletín Climático 1999, elaborado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), consigna que el fenómeno La Niña fue considerado como intenso durante el mes de enero, moderándose durante los meses de febrero, marzo y abril debido a un debilitamiento de la condición climatológica.

Respecto a las temperaturas, el mes de enero se caracterizó por anomalías positivas de las temperaturas máximas, que luego se mostraron moderadas hasta el mes de abril. El mes de mayo se observó anómalamente cálido mientras que los meses de junio, julio y agosto fueron clasificados como anómalamente fríos. Durante el mes de septiembre y octubre las temperaturas máximas fueron más bajas que lo normal. El mes de noviembre no presentó variaciones significativas, mientras que diciembre se caracterizó por fluctuaciones en sus valores extremos.

En cuanto al patrón pluviométrico, este se caracterizó por mantener una condición de déficit durante el otoño y parte de invierno, alcanzando al mes de julio una déficit acumulado entre el 40 y 60% (Boletín Climático 1999, DGF). Lo anterior pese a registrar precipitaciones de cierta intensidad en el mes de mayo. Durante el mes de agosto y septiembre la precipitación observada ayudo a normalizar el patrón pluviométrico culminando el año 1999, con un superávit en la Región Metropolitana entre un ~10 a 18%, según registros de la Dirección Meteorológica de Chile (Carrasco y Quintana, 2004).

Desde el punto de vista de los problemas de contaminación atmosférica en la cuenca Santiago, la evolución característica de la circulación atmosférica de la zona central, muestra que en periodos del fenómeno La Niña, parece ser más recurrente la aproximación de sistemas frontales débiles y de carácter estacionario, con baja o nula precipitación, (configuraciones

---

<sup>9</sup> ENOS, sigla para referirse a "El Niño Oscilación del Sur".

denominadas como BPF por Rutllant y Garreaud 2005), generando condiciones de mala ventilación en al menos un tercio del total de episodios críticos de contaminación por Material Particulado observados en los periodos de otoño-invierno en la zona de interés (Garreaud y Rutllant, 2006).

## 2. Revisión bibliográfica

### 2.1. Componente meteorológica de la contaminación atmosférica en Santiago

Desde el desarrollo de las primeras indagaciones sobre la componente meteorológica de la contaminación en Santiago en la década de los 70, se destacó la importancia de los aspectos climatológicos y la modulación de los sistemas sinópticos sobre los fenómenos de contaminación de la cuenca (Rutllant, 1979). Se reconoció luego, el rol de las inversiones térmicas por enfriamiento radiativo y de subsidencia asociadas al anticiclón subtropical del Pacífico suroriental, así como el efecto del factor geográfico, que por una parte, interactúa térmica y mecánicamente con el forzamiento sinóptico y con el desarrollo de las circulaciones locales, y por otra, confina el área urbana de la ciudad y sus emisiones (Rutllant y Aceituno, 1992).

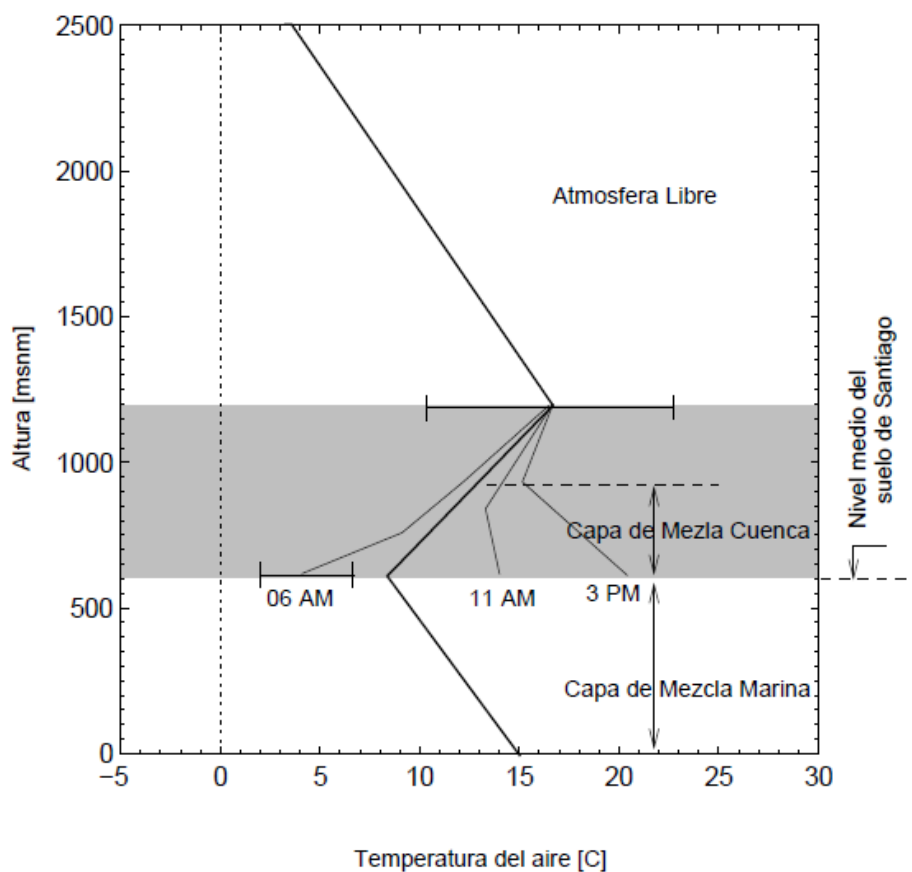
Respecto de las inversiones térmicas de tipo radiativo, análisis preliminares indican que en Santiago los ciclos de calentamiento diurnos y enfriamiento nocturnos modulan el gradiente térmico vertical de la atmósfera superficial, especialmente durante el día lo que se manifiesta en la amplitud térmica observada especialmente en días despejados y semicubiertos (Ulriksen, 1980). Una evaluación estadística de la estabilidad estática<sup>10</sup> sobre Santiago desarrollada una década antes por Aceituno (1971), sugirió la existencia de diferencias significativas en la estabilidad superficial tanto en el ciclo anual como diario. Las observaciones realizadas en esa oportunidad, indicaron que a partir del otoño se observa estabilidad en todo el espesor (0 – 700 m) aunque menor al invierno donde cerca del 70% de días evaluados presenta alta estabilidad en los primeros 100 m de espesor.

Junto al efecto superficial, es de particular importancia la inversión térmica por subsidencia que está presente a lo largo de la costa norte y central de Chile (Garreaud y Rutllant, 2006), y que se manifiesta por efecto de la compresión del aire descendente asociado al sistema de alta presión y las aguas frías, observándose en la zona central cerca del 70% de los días de invierno

---

<sup>10</sup> Se define la estabilidad estática de la atmósfera, cuando bajo el supuesto de equilibrio hidrostático y suponiendo un proceso adiabático no saturado, el gradiente vertical de temperatura queda definido como  $(dt/dz)_a = -g/c_p \sim -0.98$  [°C/100m]. Así, un gradiente térmico  $dt/dz$  observado mayor, menor o igual al valor teórico define condiciones de estabilidad, inestabilidad o condiciones neutras. Una inversión térmica es entonces una condición extrema de estabilidad.

(Rutllant, 1981). Un esquema de la altura del tope y base de la inversión térmica de subsidencia se presenta en la figura 2.1.



**Figura N°2.1.** Esquema del perfil vertical de temperatura sobre la zona central de Chile, (~33°S), tomado de Rutllant y Garreaud, 2006.

El efecto de la circulación atmosférica promedio en la cuenca de Santiago ha sido descrita por Rutllant y Garreaud, (2004), y se ha definido como el resultado de la modificación que genera el relieve regional y la superficie continental sobre el flujo de gran escala. Los efectos de la circulación media en la contaminación atmosférica de Santiago se han estudiado especialmente en los casos en que el aumento de concentraciones de Material Particulado se ha asociado al desarrollo, evolución y culminación de las bajas costeras.

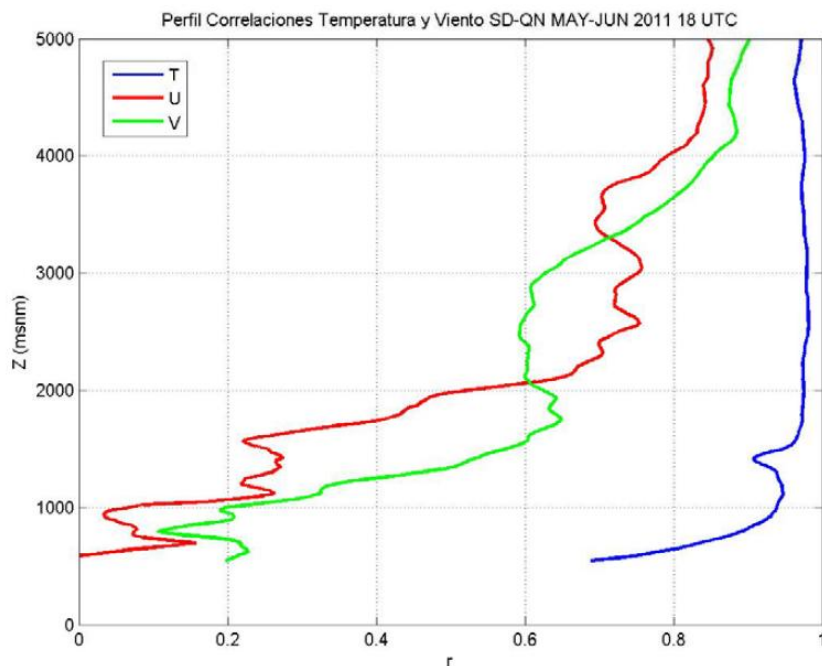
La inversión térmica de subsidencia sobre Chile central se observa tanto en la costa como en la cuenca de Santiago, y en general su tope promedio se ha identificado al mismo nivel tanto en el valle como en la costa, con una altura del orden de ~1200 msnm. (Rutllant y Garreaud, 2006). No obstante, la cuenca de Santiago, como se indicó en 1.3, se ubica en promedio a unos ~ 550

msnm y está delimitada al poniente por la cordillera costera (~ 2.000 msnm), por lo tanto, además del efecto del relieve, se tiene que el ciclo diario del calentamiento y enfriamiento superficial son determinantes en la ubicación de la base de dicha inversión.

Respecto al comportamiento de los perfiles verticales de temperatura dentro y fuera de la cuenca, una comparación preliminar de estos perfiles obtenidos a partir de radiosondeos efectuados desde las estaciones de Quinta Normal en el centro de la ciudad (33°26' S y 70° 41' W, a 520 msnm) y en la estación costera de Santo Domingo (33° 39' S y 71° 36' W, a 75 msnm), ambos desarrollados durante el año 2011 por la Dirección Meteorológica de Chile, indicó que las mayores diferencias entre los perfiles de Santo Domingo y Santiago se observan entre los 500 y 1000 msnm, especialmente en los sondeos de las 12 UTC (~ 08:00 HL). Durante el invierno las temperaturas cerca de la superficie de Santiago son en promedio hasta 3°C más frías que las temperaturas del perfil de Santo Domingo al mismo nivel, mientras que en el verano son en promedio 7°C más cálidas. Estas discrepancias se deben probablemente al calentamiento y enfriamiento de la topografía de la cuenca que los perfiles de temperatura de Santo Domingo no pueden capturar (Muñoz y Corral, 2011).

Si bien la variable viento (velocidad y dirección) no se analizará en este trabajo, se debe consignar que en el análisis de radiosondeos citado antes, el régimen de viento muestra que ambos sondeos reflejan tanto la intensificación de los vientos en altura durante el periodo invernal, como su debilitamiento bajo los 3000 msnm. No obstante, las velocidades del viento en el valle son menores que las observadas en Santo Domingo al mismo nivel entre las alturas de 500 a 1500 m, sin una variación estacional muy significativa. Lo anterior estaría asociado al estancamiento del aire inducido por la topografía de Santiago en comparación con los intensos vientos de la capa límite costera, que por lo general toman forma de un jet o chorro costero de baja altura (Garreaud y Muñoz, 2005). La relación entre las variaciones interdiarias entre Santiago y Santo Domingo para la temperatura y viento, se muestran en la figura 2.2.





**Figura N°2.2.** Correlación entre los radiosondeos de Santo Domingo (interpolados a 18UTC) y Santiago (mayo-junio 2011 18UTC estación Quinta Normal), desarrollados por la Dirección Meteorológica de Chile en convenio con el Ministerio del Medio Ambiente. Perfiles verticales de coeficientes de correlación entre temperatura (azul), viento zonal (rojo) y viento meridional (verde). Tomado de Muñoz y Corral, 2011.

### 2.1.1. Forzante sinóptica asociada a episodios críticos de Material Particulado

La caracterización realizada sobre de los patrones sinópticos que presentan una fuerte relación con la ocurrencia de episodios y su seguimiento diario a partir del año 2000 con la implementación de la Gestión de la Calidad del Aire en la Región, permiten hoy reconocer las configuraciones que modulan en algunos casos, el inicio, el desarrollo y el término de los eventos críticos de contaminación. Un ejemplo de lo anterior lo constituyen las configuraciones denominadas tipo A y BPF, documentadas por Rutllant (1994), y Rutllant y Garreaud, (2006).

La definición de configuraciones de tipo A y BPF ha sido utilizada con fines prácticos en el pronóstico meteorológico para calidad del aire en la Región Metropolitana, describiéndose de manera general como se indica en el cuadro adjunto:

**Cuadro N°1. Configuraciones sinópticas asociadas a episodios de contaminación atmosférica en la ciudad de Santiago**

Tipo	Características Meteorológicas
<b>A</b>	Situación Post-Frontal caracterizada por la penetración de una alta presión fría sobre Argentina coincidente con la entrada de una dorsal cálida en altura sobre Chile Central. Aparición de una baja costera al norte como una baja a sotavento que se propaga hacia el sur como una onda atrapada entre la inversión térmica de subsidencia del anticiclón subtropical y la ladera andina occidental.
<b>BPF</b>	Situación Pre-Frontal (entrada de una vaguada en la tropósfera media) que corresponde a una aproximación frontal desde el suroeste generalmente débil o parcialmente ocluido, que aumenta localmente el gradiente meridional de presión entre una cuña Pre-Frontal y la depresión costera a punto de llenarse, generando un flujo del Este. Esta condición precede en algunos casos al comienzo de la precipitación.

Fuente: Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica en Santiago de Chile: Hacia la predicción de episodios. Rutllant et al (1992).

Es importante considerar que la distribución espacial de los máximos de concentración observados en las distintas estaciones de monitoreo de calidad del aire en Santiago, así como el tiempo de duración de los episodios, dependen en gran medida del grado de uniformidad del patrón de emisiones de contaminantes durante el día y de la variación del ciclo diario de la estabilidad atmosférica en la tropósfera baja sobre la cuenca (Garreaud, 2006), lo que reafirma la necesidad de realizar observaciones del factor meteorológico de la contaminación a escala local. En efecto, no se debe perder de vista que las fuentes de contaminantes presentan una gran variabilidad espacial y temporal, y que las concentraciones observadas finalmente, dependerán también de la forma y variabilidad con que los fenómenos meteorológicos afectan a dichas emisiones<sup>11</sup>.

Desde el punto de vista de escala sinóptica, se ha reconocido que tras el paso de un sistema de alta presión fría de carácter migratorio en torno a los 38 y 40°S, en interacción con la cordillera de los Andes, se genera un cambio de signo en el gradiente meridional de presión superficial típicamente observado, induciendo la formación de una circulación de baja presión (baja-

<sup>11</sup> Los fenómenos meteorológicos desde un punto de vista práctico son caracterizados en distintas escalas de tiempo y espacio, por ejemplo escala sinóptica, mesoescala y microescala. En el ámbito de la contaminación atmosférica por Material Particulado, el seguimiento con resolución horaria hace que la caracterización de los fenómenos meteorológicos en meso y micro escala sean de gran interés.

costera) de características sub-sinópticas que se desarrolla a lo largo de la costa. Junto al desarrollo de la baja costera se observa la aparición de un flujo del Este (Rutllant y Garreaud, 2004), mientras en altura, generalmente al W de la cordillera se observa un flujo con curvatura de dorsal (en ocasiones con un pronunciado eje NW-SE) que en su parte delantera presenta subsidencia generando calentamiento de la troposfera media y baja, reforzando la estabilidad en las capas más bajas de la atmósfera. Una descripción detallada de las bajas costeras y su dinámica se puede ver en Garreaud y Rutllant (2003).

Esta configuración de dorsal en altura con vaguada costera (en adelante D/Vc)<sup>12</sup>, genera en definitiva una serie de cambios en la estructura atmosférica regional, en particular sobre el perfil vertical de temperatura, controlando no tan solo la ocurrencia de los episodios de contaminación, sino que también su culminación. En efecto, la circulación ciclónica asociada a la baja, induce en el sector norte de la baja presión un flujo de componente W que mantiene aire húmedo bajo la capa de inversión de subsidencia desarrollando nubosidad baja, que se prolonga por el borde costero, y una vez que la capa de mezcla marina recupera su nivel característico, tras el debilitamiento del efecto subsidente de la dorsal, se traduce en una advección de aire costero frío y húmedo hacia los valles interiores, provocando la remoción del aire contaminado, una disminución marcada de las concentraciones de contaminantes y, por lo tanto, el término del episodio de contaminación.

Las advecciones costeras asociadas a la culminación de vaguadas costeras se manifiestan con un gradiente de presión costa-valle<sup>13</sup> del orden de ~ 3 a 4 hPa, lo que genera una disminución de las concentraciones de Material Particulado en las estaciones de monitoreo con episodios, desde concentraciones horarias del orden de ~ 200 ug/m<sup>3</sup>N, a valores del orden de ~ 40 a 20 ug/m<sup>3</sup>N, en un rango de 3 a 5 horas (notas técnicas Corral, 2012).

Los episodios pre-frontales (en adelante PF) se han descrito como casos donde la mala ventilación es asociada a la aproximación desde el SW de un sistema frontal débil o parcialmente ocluido (con abundante nubosidad media y alta), que se mantiene estacionario

---

<sup>12</sup> Con el objeto de no perder de vista las configuraciones sinópticas asociadas a los episodios tipo A y BPF en el caso de Dorsal y Vaguada Costera de usará (D/Vc) y (PF) para las configuraciones Pre-Frontales.

<sup>13</sup> Un seguimiento diario al gradiente de presión de las 18 UTC, entre la costa (Santo Domingo) y el valle (Santiago) es realizado en el marco del pronóstico operacional de Calidad del Aire, que desarrolla desde el año 2011 por la Dirección Meteorológica de Chile y el Ministerio del Medio Ambiente.

sobre la zona sur del país, sin precipitaciones y sin viento significativo sobre Santiago. Esta condición sinóptica se ha asociado a una capa de mezcla superficial reducida debido a la disminución de la radiación solar por causa de que la cobertura nubosa. Este tipo de configuración sería más recurrente en periodos invernales con presencia del fenómeno La Niña (Garreaud y Rutllant, 2003).

Un análisis de 28 episodios entre abril y agosto de los años 1989 y 1990, mostró que 17 de ellos coincidieron con depresiones costeras post-frontales (tipo A), 9 episodios coincidieron con una depresión costera en disolución al norte de una cuña post-frontal (tipo BPF), y dos restantes (A y BPF), asociados a una situación de bloqueo en el cono sur. Cabe indicar que las configuraciones BPF, en ocasiones son acompañadas de flujos de viento que mejoran la ventilación en la cuenca (Rutllant, et al 1992).

### **2.1.2. Fenómenos de meso y microescala en la cuenca de Santiago**

Además de las forzantes sinópticas y la variabilidad de las emisiones, la remoción de contaminantes desde la cuenca de Santiago obedece finalmente, a las posibilidades de transporte de los contaminantes en las capas bajas o desde niveles cercanos a superficie, lo que depende en gran medida de la intensidad del viento que se pueda generar, tal que se favorezca el transporte y dilución de los contaminantes.

En Santiago se observa un marcado ciclo diario de calentamiento y enfriamiento radiativo de la superficie de la cuenca, lo que sumado a sus características topográficas genera gradientes de presión que se traducen en flujos superficiales de mesoescala del tipo brisa de valle – montaña (diurno) y montaña - valle o flujo catabático (nocturno), ver por ejemplo, Whiteman (1990). Estos flujos han sido observados en campañas de monitoreo meteorológico realizadas, donde se ha identificado el efecto del relieve y la rugosidad, evidenciando por ejemplo, un régimen diurno típico de componente del S - SW y uno nocturno de flujos de componente E- NE (ver por ejemplo, Ulriksen et al, 1992). Durante la noche y madrugada, una débil brisa del Este ha sido relacionada con flujos de drenaje de aire más frío (enfriamiento superficial) desde la cordillera hacia el valle central (hacia niveles más bajos), con valores de flujo zonal máximo cerca de los 700 m con velocidades zonales (u) de  $\sim 1.5$  m/s. En el día se desarrolla una brisa del Sur Oeste entre superficie y los 500 m con velocidades zonales máximas del orden de  $\sim 3$  a 5 m/s (Garreaud y Rutllant, 2006).

Un análisis del viento zonal observado específicamente en la estación superficial de calidad del aire de Pudahuel (O), entre los años 2000 - 2002, en condiciones de episodio de contaminación, indicó que el viento típico durante la noche es extremadamente calmo. La componente zonal (u), presenta un ciclo diario medio con magnitud cercana a cero durante la noche (21 a 08 HL) y, valores positivos y crecientes entre las 10 a 17 HL con valores máximos del orden de ~ 1 m/s. La componente meridional (v), tiene también un crecimiento durante el día entre las horas 12 a 17 HL con valores de ~ 2 m/s, y un decrecimiento más suave durante la noche entre las 18 a 10 HL (Muñoz, et al 2003).

Desde la perspectiva de este trabajo, el perfil vertical de temperatura cerca de la superficie juega un rol de gran importancia pues los valores de temperatura superficial y los valores de temperatura en capas superiores determinan las condiciones de estabilidad en la superficie. Más aún, siendo exhaustivos, corresponde indicar que la radiación que llega a superficie y que puede evaluarse a través del Balance de Energía Superficial, controla la variabilidad de la temperatura superficial lo que afecta directamente la estabilidad superficial y, por lo tanto, el desarrollo y evolución de la turbulencia en la capa límite atmosférica. Una descripción detallada de la importancia del balance de energía superficial en la capa límite se puede encontrar en Garratt 1992, capítulo 5 y Stull 1988, capítulo 7.

Desde este punto de vista, cobra gran importancia en el seguimiento de los fenómenos de contaminación atmosférica, cuantificar los niveles de turbulencia, su ciclo diario, y particularmente los factores que la modulan, lo que nos sitúa en el seguimiento de las variables meteorológicas en la capa límite, siendo necesario entonces considerar los fenómenos meteorológicos de micro escala.

En la capa límite, la velocidad del viento disminuye rápidamente al acercarse a la superficie, mientras que la turbulencia depende por una parte del factor mecánico y por otra de la estabilidad atmosférica que modula su intensidad (aumento o disminución). La mezcla que se desarrolla en las capas bajas de la atmósfera está íntimamente relacionada con el carácter turbulento de la misma, por lo que los flujos en el interior de la capa límite son aleatorios y disipativos (Garatt, 1992, pág.15). Esta última característica es de gran importancia, pues facilita la mezcla de las propiedades del aire y de los contaminantes emitidos en ella. El desarrollo de la capa límite en regiones con predominio de altas presiones y valles interiores como es el caso de la zona central de Chile, ha sido esquematizada a partir de una estructura

con tres componentes principales: La capa de mezcla, capa residual y capa estable (Stull 1988, pág 10).

En Santiago, en días despejados, la capa límite diurna tiene un desarrollo de capa límite convectiva o capa de mezcla, que crece sobre la inversión de temperatura que permanece desde la noche anterior (Undurraga, 2010). Después de la salida del sol, el suelo empieza a calentarse, tal que la convección comienza a transportar aire a niveles más altos y a producir mezcla. La capa estable comienza a erosionarse desde abajo, mientras la capa de mezcla aumenta de espesor con el tiempo, alcanzando su máxima altura en torno a la hora de la máxima temperatura superficial. La capa estable formada durante la noche puede llegar a desaparecer totalmente si el calentamiento superficial es suficientemente intenso. Si el calentamiento superficial diurno no es lo suficientemente intenso para que el perfil de temperatura se vuelva inestable, la capa de mezcla puede quedar confinada bajo la capa estable (Ulriksen, 1980). La mezcla genera que el perfil vertical de temperatura sea muy cercano al valor del gradiente adiabático seco (estabilidad neutra), mientras que cerca de superficie, el perfil es inestable. Antes del atardecer se inicia nuevamente la formación de una capa estable superficial debido al enfriamiento de la superficie (Garraat, 1992, pág.145).

Las condiciones de estabilidad en la capa límite que se observan típicamente en las noches, en especial aquellas despejadas, dan origen a inversiones térmicas radiativas, cuyo espesor crece en la medida que la temperatura superficial disminuye, lo que se asocia a las características de la superficie (emisividad), al contenido de humedad de las capas bajas, o presencia de nubes que pueden minimizar la intensidad de la inversión o inhibirla. En la noche puede existir turbulencia intermitente, donde predomina el factor mecánico, desarrollándose espesores más grandes y menos estables, en contraste con noches muy estables, donde la inversión térmica es más intensa y de menor espesor.

Se ha observado que la estabilidad nocturna en la cuenca también es un factor importante en la evolución de la capa límite, dando lugar en algunos casos a eventos de capa límite muy someras durante invierno, las que han sido asociadas con un calentamiento sobre la capa límite (Undurraga, 2010).

Algunas mediciones históricas han mostrado que en los meses más fríos, la altura mediana de la capa de mezcla alcanza en Santiago unos 400 m, mientras que en los meses más cálidos se superan frecuentemente los 1000 m a las horas de mayor calentamiento superficial (Ulriksen,

1980). Estimaciones de la altura de capa de mezcla a partir de datos de reflectividad obtenidos desde el nefobasímetro del DGF (ver nota al pie de página N°3) ubicado en el centro de Santiago, indicaron que para días despejados de invierno a las 12 HL se registraron alturas del orden de 200 m, cuatro veces menor que en el periodo cálido (~ 800 m), con un rango intercuartílico de 200 m de poca variabilidad durante el año (Muñoz y Undurraga, 2010).

Análisis desarrollados a partir de información obtenida por equipo LIDAR, también en la zona centro de Santiago, muestran que la evolución diaria de la atmósfera superficial en Santiago durante el invierno presenta varios tipos de fenómenos meteorológicos, por ejemplo, durante el mes de mayo de 2011, se observan termas convectivas, limpieza de media tarde, oscilaciones boyantes matinales y vespertinas, termas nocturnas, capas de aerosoles, oscilaciones de baja frecuencia, ingreso de estratos, desarrollo capa convectiva no mezclada y termas nocturnas (Muñoz y Alcañuz, 2011).

Al atardecer, cuando el aporte de energía solar termina (transición vespertina), la capa de mezcla disminuye fuertemente su espesor, lo que se traduce en una estratificación neutra que define la capa límite residual, que se forma sobre la capa estable superficial. Esta capa mantiene en su seno los contaminantes emitidos en horas previas, y su espesor disminuye en la medida que la capa estable aumenta durante la noche. (Stull 1998, pág 14-15).

En definitiva, la estabilidad del perfil vertical de temperatura en las primeras capas de la atmósfera, está fuertemente relacionada con la capacidad de dispersión de contaminantes desde la capa límite, condición que a su vez presenta gran variabilidad durante el año, variabilidad en escala sinóptica, variación interdiaria y variabilidad durante ciclo diario, especialmente entre el periodo diurno y nocturno.

## **2.2. Contaminación urbana por Material Particulado en Santiago**

En Santiago, a más de 15 años de implementado un Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA), el Material Particulado sigue siendo un problema serio de contaminación, en especial debido a la ocurrencia de episodios críticos, que como se ha indicado antes se observan particularmente durante el periodo otoño-invierno. Si bien los episodios críticos de contaminación por MP10 han disminuido en el tiempo debido al control de las emisiones de contaminantes asociados a dicho Plan, estos se siguen presentando, lo que pone de manifiesto la relevancia del factor meteorológico en la ocurrencia de estos fenómenos.

### **2.2.1. Material Particulado Respirable (MP10)**

El material particulado respirable (MP10) es un contaminante atmosférico formado por materia sólida o líquida constituida por una compleja mezcla de compuestos orgánicos e inorgánicos. El MP10 de origen urbano, como es el caso del observado en la zona de estudio, es emitido directamente desde las fuentes emisoras (contaminante primario) y formado también a partir de procesos físico-químicos en la atmósfera de la ciudad (contaminante de tipo secundario).

La emisión primaria del material particulado puede derivar desde fuentes naturales (erosión del suelo árido o por arrastre, desde erupciones volcánicas, y contener polen y/o microorganismos, etc.) y de fuentes antropogénicas, donde la generación principal es la quema de combustibles fósiles (transporte e industria). La formación secundaria de aerosoles se debe a reacciones entre contaminantes gaseosos tales como dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), amoníaco (NH<sub>3</sub>) y compuestos orgánicos volátiles (COV), todos los cuales son emitidos directamente a la atmósfera (adaptado de Jorquera, 2002).

Estudios de caracterización del MP10 desarrollados en Santiago indican que de las concentraciones promedio cerca de un 30% es de origen natural (background), mientras que el 70% restante se atribuye a emisiones desde fuentes fijas y móviles (procesos industriales, transporte y quema de leña residencial, entre otros). Ver por ejemplo, Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana (D.S.N°66/2010 Minseges).

El análisis de tendencias de las concentraciones de Material Particulado que se ha desarrollado en la Región Metropolitana, muestra que el aumento de MP10 durante el invierno se debe principalmente a un aumento en la concentración MP<sub>2,5</sub> (Universidad de Concepción, 2002; Usach, 2006), en especial durante los episodios críticos donde la composición química de contaminantes muestra, por ejemplo para la estación de Pudahuel (O), presencia de iones inorgánicos (nitrato, sulfato, amonio y cloruro) y un gran porcentaje Carbono Orgánico (OC) y Carbono Elemental (EC) ratificando la incidencia de la combustión de biomasa y de combustibles fósiles como una causa principal de las concentraciones del MP<sub>2,5</sub> y por tanto del aumento del MP10 observado en el periodo otoño-invierno<sup>14</sup>, especialmente en el periodo nocturno.

---

<sup>14</sup> El aerosol de carbono es clasificado como Carbono Orgánico (OC) y Carbono Elemental (EC), este último conocido también como carbón negro (Black Carbon). El EC es un contaminante de tipo primario químicamente estable, lo que permite seguirlo como un trazador de procesos de combustión de todo tipo.



Respecto al efecto en salud, durante el periodo 2007-2011 se han desarrollado en la Región Metropolitana, Indicadores de Salud del Aire (ISA), para MP10 y MP2,5 (Usach, 2011). El ISA monitorea el porcentaje de la mortalidad total<sup>15</sup> que puede atribuirse a la exposición a estos contaminantes, que es proporcional al nivel de riesgo. Las estimaciones desarrolladas para la ocurrencia de Episodios Críticos por MP10 para el periodo 1997-2009 indicó que hubo 75 muertes/día (11,23 muertes prematuras en días de Alerta Ambiental, y 15,75 en días de preemergencia), lo que se traduce en 1.608 muertes prematuras atribuibles a la Calidad del Aire en 1997 y 178 durante el 2009. Para el MP2,5 se cuantificaron 234 muertes atribuibles a los episodios cuando se alcanzó el rango de Alerta en el año 2000 (inicio monitoreo de MP2,5) y 23 para el 2009, lo anterior posiblemente explicado por la mayor toxicidad del particulado fino. En los dos casos hubo una disminución cuantificable asociada a la disminución de los episodios de contaminación.

### **2.2.2. Episodios Críticos de contaminación por MP10**

Los Índices de Calidad del Aire referido a Partículas (ICAP) por definición operacional, corresponden a los eventos en que el ICAP supera un nivel umbral definido en la normativa ambiental vigente. El D.S. N°59/98 define la norma de calidad del aire primaria para MP10, en especial los niveles de Emergencia Ambiental (ver cuadro N°2 adjunto). Cabe indicar que no se encontró registro que explique de forma objetiva los criterios con que se definen dichos niveles de episodio, aunque se presume que estos fueron asociados a concentraciones máximas registradas en episodios de gran intensidad observados entre los años 1996 y 1997.

---

El OC, si bien es emitido por combustión, también se genera en forma secundaria debido a la presencia de hidrocarburos gaseosos, en procesos de condensación, absorción y/o adsorción. Estos Aerosoles Orgánicos Secundarios (AOS) participan en los procesos del smog fotoquímico.

<sup>15</sup> La mortalidad total es el resultado de la combinación de una variedad de factores de riesgo, tales como edad, sexo, raza, obesidad, historia como fumador, educación, estado civil, dieta, consumo de alcohol y exposición ocupacional, etc.

**Cuadro N°2. Categorías de Calidad del Aire para MP10 en la Región Metropolitana, según norma primaria de Material Particulado Respirable**

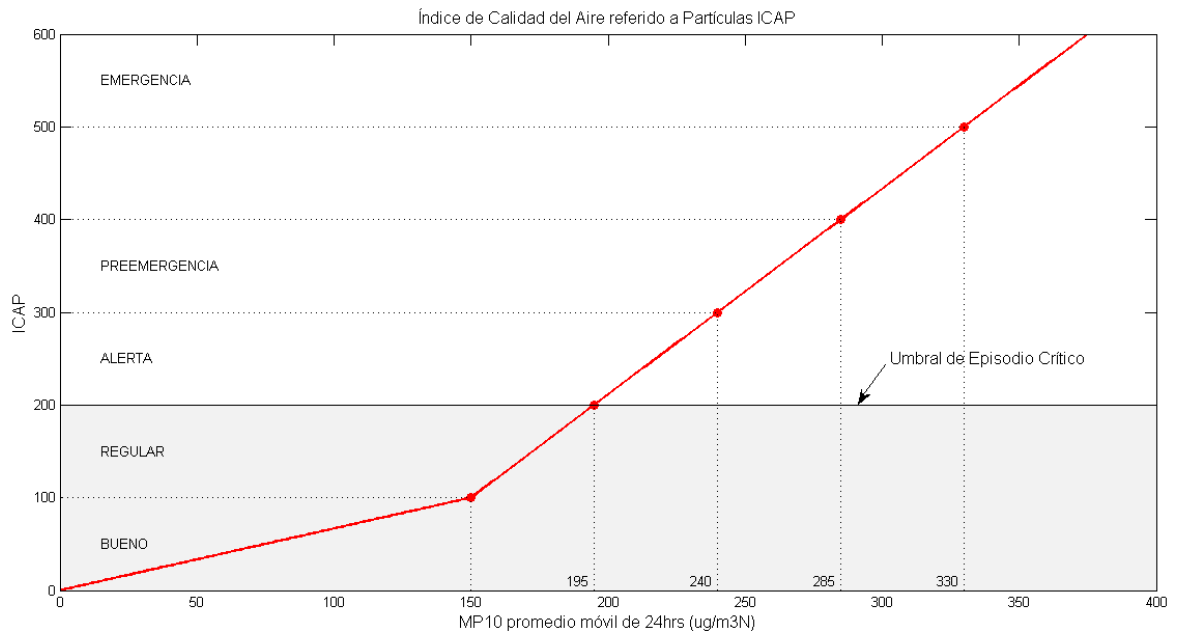
Promedio 24 hrs. de MP10 en ug/m3N	Índice de Calidad del Aire (ICAP)	Estado de la Calidad del Aire
$0 \leq \text{ICAP} \leq 149$	$0 \leq \text{ICAP} \leq 99$	Bueno
$150 \leq \text{ICAP} \leq 194$	$100 \leq \text{ICAP} \leq 199$	Regular
$195 \leq \text{ICAP} \leq 239$	$200 \leq \text{ICAP} \leq 299$	Malo
$240 \leq \text{ICAP} \leq 284$	$300 \leq \text{ICAP} \leq 399$	Crítico
$285 \leq \text{ICAP} \leq 329$	$400 \leq \text{ICAP} \leq 499$	Peligroso
$\geq 330$	$\geq 500$	Excede

Fuente: D.S. N°59/98 Norma primaria de Calidad del Aire para Material Particulado Respirable, en especial los valores que definen situaciones de emergencia ambiental

Para cuantificar la evolución diaria del ICAP se cuenta con una red de estaciones de monitoreo continuo, en este caso equipos tipo TEOM<sup>16</sup>, los que generan promedios horarios de 24hrs que son asociados al ICAP a través de las relaciones lineales indicadas en la figura N°2.3 adjunta. La relación del ICAP y el promedio de MP10 de 24hrs en unidades ug/m3N, mantiene una pendiente que cambia cuando las concentraciones promedio superan los 195 ug/m3N. La calidad del aire se considera en el rango de bueno hasta los 149 ug/m3N, y en Regular entre los 150 y 195 ug/m3N. La relación cambia entonces de pendiente sobre los 195 ug/m3N (200 ICAP) lo que se considera una condición de Alerta Ambiental hasta los 240 ug/m3N (300 ICAP) donde la condición es de Preemergencia y hasta los 330 ug/m3N (500) donde se configura una condición de Emergencia Ambiental.

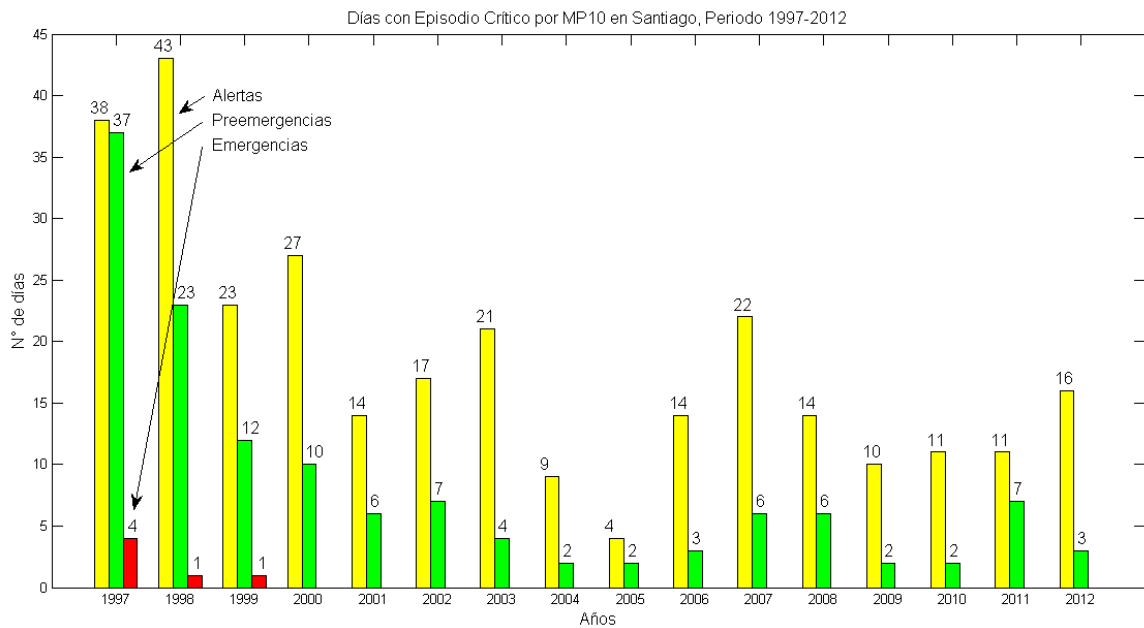
Los días de episodios críticos de contaminación durante el periodo frío (abril - agosto), presentan desde 1997 una disminución que se ha atribuido a las medidas de control y reducción de emisiones asociadas al Plan de Prevención y Descontaminación (PPDA). En la figura 2.4., se observa que el año 1999 fue el último periodo donde se generó una emergencia ambiental. En la figura 2.5 se muestra la evolución de las horas en que se estuvo en condición de episodio crítico, evidenciando que existen diferencias de intensidad en los episodios, que en algunos casos se mantuvieron durante más de 24 horas.

<sup>16</sup> TEOM, son las siglas de Tapered Element Oscillating Microbalance, y consiste en un monitor de microbalanza que colecta partículas en forma continua a través de un filtro que es expuesto a un flujo de aire constante.



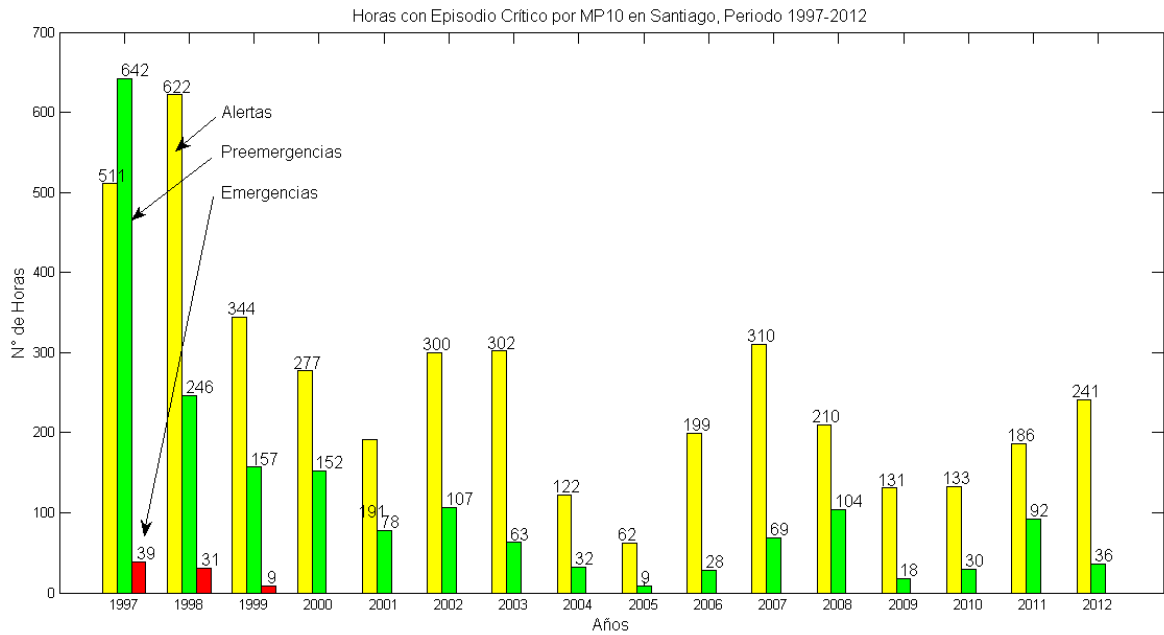
**Figura N°2.3** Funciones lineales que relacionan las concentraciones promedio de 24hrs con el Índice de Calidad del Aire referido a Partículas (ICAP).

Fuentes: Departamento de Planes, Ministerio del Medio Ambiente



**Figura 2.4** Evolución del número de episodios críticos de contaminación por Material Particulado (MP10) en la Región Metropolitana desde la entrada en vigencia del PPDA. Se contabilizar el número de Alertas, Preemergencias y Emergencias según el Índice de Calidad del Aire Referido a Partículas (ICAP).

Fuente: Departamento de Planes, Ministerio del Medio Ambiente.



**Figura 2.5** Evolución de las horas en que se ha estado bajo una condición de episodio crítico de contaminación por Material Particulado (MP10) en la Región Metropolitana.

Fuente: Departamento de Planes, Ministerio del Medio Ambiente.

No obstante lo anterior, y más allá de lo complejo que resulta a la población de Santiago discriminar entre promedios horarios, promedios de 24hrs y niveles de episodios, se debe contemplar que en definitiva los episodios críticos corresponden a un incremento de las concentraciones horarias de material particulado (ver capítulo 4), como consecuencia de la emisión diaria de contaminantes, cuya remoción diaria desde la cuenca depende finalmente de la evolución de las configuraciones meteorológicas a distintas escalas. Una descripción más detallada sobre el ICAP y su relación con la variación de las concentraciones horarias se presenta en el capítulo 4, subsección N°4.3.2.

### 3. Descripción de las bases de datos utilizadas

Para el desarrollo de este trabajo se contó con series de tiempo de temperatura y de material particulado levantadas en la cuenca de Santiago durante el periodo 1999. Las series de temperatura se obtuvieron desde las bases de datos históricas de la red meteorológica del proyecto Conama-Cenma<sup>17</sup>. En particular, se utilizan los datos de temperatura de la torre La Platina y de Temperatura virtual obtenidas a partir de la operación del perfilador atmosférico LapRass. También se accedió a los datos de temperatura observados en la red oficial de calidad del aire regional, red Macam<sup>18</sup>. Ver cuadro 3.1.

**Cuadro 3.1 Estaciones Meteorológicas de la Red Conama-Cenma y Red Macam consideradas en este trabajo**

Estaciones	VARIABLES observadas	Lat. (°S)	Lon. (°W)	Altura msnm	Comuna
Torre La Platina <sup>a</sup>	T2 m, DT08 m y DT22 m	33,57	70,62	652	La Pintana
LapRass <sup>a</sup>	Perfiles Temperatura Virtual	33,57	70,62	652	La Pintana
Lo Prado <sup>a</sup>	Temperatura ~ 10 m	33,45	70,93	1.065	Lo Prado
Torre Entel <sup>a</sup>	Temperatura ~ 120 m	33,44	70,65	681	Santiago
La Paz (F) <sup>b</sup>	Temperatura ~ 10 m, MP10	33,42	70,65	540	Independencia
La Florida (L) <sup>b</sup>	Temperatura ~ 10 m, MP10	33,51	70,59	600	La Florida
Las Condes (M) <sup>b</sup>	Temperatura ~ 10 m, MP10	33,37	70,52	810	Las Condes
P. O'Higgins (N) <sup>b</sup>	Temperatura ~ 10 m, MP10	33,46	70,66	510	Santiago
Pudahuel (O) <sup>b</sup>	Temperatura ~ 10 m, MP10	33,43	70,75	480	Pudahuel
Cerrillos (P) <sup>b</sup>	Temperatura ~ 10 m, MP10	33,49	70,72	510	Cerrillos
El Bosque (Q) <sup>b</sup>	Temperatura ~ 10m, MP10	33,54	70,66	570	El Bosque

Fuente: Elaboración propia a partir de estudio "Evaluación y Propuesta de Rediseño para la Red de Monitoreo Automático de Calidad del Aire de la Región Metropolitana Red MACAM-2, Informe Final 2007", y estudio "Criterios Técnicos Requeridos para Calificar Estaciones de Monitoreo de MP2,5 como Estación de Monitoreo Representación Poblacional EMRP, informe final 2011". a) Operadas por CENMA b) Operadas por la Autoridad Sanitaria RM.

<sup>17</sup> La Comisión Nacional del Medio Ambiente (Conama) y el Centro Nacional del Medio Ambiente (Cenma), operaron entre los años 1996 y 2010 una red meteorológica en la cuenca de Santiago, cuyo objetivo fue apoyar el pronóstico y la modelación de contaminantes en la Región Metropolitana. Esta red fue instalada en etapas sucesivas, a través de la cooperación internacional con los estados de Suecia, Holanda y Japón (ver Informe técnico Cenma, Red Meteorológica Optimizada, septiembre de 2001). Datos disponibles en <http://www.mma.gob.cl>.

<sup>18</sup> Durante el año 1997 se instaló en Santiago la Red de Monitoreo Automática de Calidad del Aire y Meteorología (Red Macam), bajo la administración del Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente (Sesma). Luego la red pasó a la Secretaría Regional Ministerial de la Región Metropolitana, en su rol de Autoridad Sanitaria Regional, hasta el 01 de enero de 2012, cuando es transferida al Ministerio del Medio Ambiente conforme a las atribuciones de la nueva institucionalidad ambiental y a la elaboración de un convenio entre los Ministerios de Salud y del Medio Ambiente (ver resolución N°1123/2011).

Los datos de temperatura de las estaciones Lo Prado, torre La Platina y Entel, fueron obtenidos directamente desde el sistema **Airviro**<sup>19</sup>, a través de un acceso otorgado por el Ministerio del Medio Ambiente. Asimismo, se tuvo acceso a los datos meteorológicos de temperatura y de calidad del aire de la red Macam. Los datos del perfilador LapRass fueron obtenidos directamente desde los operadores (Cenma) y fueron reportados como validados, mientras que la red Macam sólo reportó como validados los datos de calidad del aire.

Si bien la implementación de un método de validación no es el objetivo de este trabajo y considerando que la validación de datos no es un proceso automático, todas las series de datos fueron inspeccionadas para identificar y evaluar posibles anomalías en la información que no se pudiera asociar a factores meteorológicos reales. Todos los archivos fueron procesados a través del programa Matlab, donde se revisó la existencia de los periodos sin datos, valores fuera de rango y bajo umbral, y saltos entre valores horarios consecutivos. En el caso de los datos meteorológicos de la red Macam sin validar se optó por la realización de un proceso básico de validación que se describe en el numeral 3.2.3 de este capítulo, donde algunos criterios básicos de control de calidad fueron tomados del Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications (EPA 2000).

---

<sup>19</sup> El sistema Airviro es un sistema de Gestión de Calidad del Aire desarrollado por el Instituto de Meteorología e Hidrología de Suecia (SMHI) a inicios de la década de los 90. El módulo de *Indico Presentation* es una de las tres herramientas principales en Airviro, destinado a adquirir, almacenar, editar, presentar, analizar, informar y exportar datos de series de tiempo de variables meteorológicas y de calidad del aire. Ver <http://www.smhi.se/airviro>.

### 3.1. Perfiles verticales de Temperatura Virtual (LapRass)

#### 3.1.1. Descripción general

Con el objetivo de estudiar los fenómenos de estabilidad en la cuenca de Santiago y su relación con los eventos de alta contaminación atmosférica, durante el año 1997<sup>20</sup> se instaló un perfilador vertical de temperatura virtual y de viento (dirección e intensidad) de tipo LapRass<sup>21</sup>. El perfilador atmosférico LapRass (Lower Atmosphere Profiler & Radio Acoustic Sounding System), operó durante el periodo de interés en dependencias del Centro La Platina del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), en la comuna de la Pintana en la zona sur del Gran Santiago.

El equipo LapRass generó perfiles de Temperatura Virtual corregida ( $T_{vc}$ )<sup>22</sup> para un total de 28 niveles de observación a partir de los 110 m, a un intervalo de 60 m. Lo anterior implica información de temperatura hasta una altura del orden de los 1.600 m. Sin embargo, una inspección sobre la completitud de las observaciones muestra que el mayor porcentaje de datos se encuentra en el espesor comprendido entre algunas decenas de metros sobre el nivel inferior de observación 110 m y en torno a los 1010 m de altura, lo que se ajusta adecuadamente a los objetivos de este trabajo.

Los datos del perfilador se encontraron respaldados en planillas de cálculo **\*.xls** para los años 1997 al 2000, y en archivos con extensión **\*.air**, post procesados para los años 1998 y 1999, siendo este último formato el generado para el sistema Airviro que fue alimentado directamente, según informó el operador, con los datos procesados desde el software de validación de datos incluido en software del perfilador. Los datos en archivos **\*.air** se encontraron en formato horario UTC - 4, correspondiente a la Hora Local (HL) oficial de Chile del periodo invierno.

---

<sup>20</sup> Equipo instalado en el marco del programa de Meteorología y Calidad del Aire desarrollado por la Comisión del Medio Ambiente Región Metropolitana (Conama RM).

<sup>21</sup> Esta tecnología fue desarrollada por la U.S. National Oceanic And Atmospheric Administration (NOAA) con licencia Vaisala y Sonoma Technology. El equipo instalado en la Región Metropolitana en Santiago en el año 1997 fue suministrado por la compañía norteamericana de servicios ambientales Radian International, que posteriormente fue adquirida por la empresa Vaisala.

<sup>22</sup> La Temperatura Virtual Corregida ( $T_{vc}$ ) es la Temperatura Virtual ( $T_v$ ) validada en un post proceso de revisión realizado por el operador del sistema, a través del software de validación del equipo, el que ejecutó un script con criterios de control de calidad predefinidos. No se tuvo acceso a dicho código.

Una inspección de los archivos \*.xls y \*.air, dio indicios de la incorporación manual de datos faltantes en las planillas de cálculo, sin embargo, la falta de documentación acerca de los procedimientos utilizados no permitió discriminar los datos reales respecto de los datos posiblemente incorporados limitando su grado de representatividad de fenómenos físicos, al menos para los propósitos de este trabajo. De lo anterior se concluye que los datos del periodo 1998 y 1999 en formato \*.air resultan ser la información más confiable que existe.

En el cuadro N°3.1 adjunto, se muestra un resumen de datos por hora y nivel entre los 110 m y los 1010 m para la temperatura observada por el LapRass y para cada periodo de datos encontrados.

**Cuadro N°3.1 Porcentaje anual de datos horarios de Temperatura Virtual obtenidos por el LapRass para el espesor 110-1010m, periodo 1997- 2000**

<b>Espesor 110m - 1010m</b>	<b>Temperatura Virtual (Tv)</b>
1997	~ 50%
1998	70% - 75%
1999	~ 80%
2000	~ 40%

Fuente: Elaboración propia a partir de datos LapRass

Para los años 1997 y 2000 se presentó el menor porcentaje de datos para el espesor, entre un 50 y 60% y 40% respectivamente. El año 1997 tuvo un muestreo intermitente asociado a la puesta en marcha del equipo y el 2000 se midió solo el segundo semestre debido a una falla técnica del equipo, monitoreando en forma continua hasta fines del periodo. El año 1998 muestra disponibilidad de datos entre un 70 y 75% para la temperatura (Tv), siendo, por lo tanto, el año 1999 el que en definitiva presentó mayor disponibilidad de datos hasta los 1010m alcanzando un 80% de información.





**Figura N°3.1.** Imagen del equipo LAP-3000 en su última ubicación (periodo 2003-2004) en dependencias del Aeropuerto Arturo Merino Benítez, zona Poniente en la Región Metropolitana, antes de ser desmantelado definitivamente por fallas de sistema. Al centro la antena del perfilador y las cuatro fuentes acústicas del Rass.

El equipo LapRass dejó de operar durante el año 2000, luego de repetidas fallas técnicas y de prolongados periodos fuera de servicio, por lo tanto, la información compilada hasta la fecha es única en su tipo. Una segunda etapa de operación se intentó durante el periodo estival 2003 - 2004 en dependencias del Aeropuerto Arturo Merino Benítez, comuna de Pudahuel en la zona poniente de Santiago. Sin embargo, seis meses de la puesta en marcha el equipo (marzo 2004) presentó nuevamente fallas técnicas quedando fuera de operación en forma definitiva. Una inspección de la información (Muñoz R., 2007)<sup>23</sup>, estableció que en este nuevo emplazamiento disminuyó drásticamente su alcance vertical durante las noches en condiciones de alta estabilidad con una pérdida importante de datos validos al final de la noche. La información de este periodo no fue incluido en este trabajo.

El sistema RASS es acoplado al perfilador de viento para obtener valores de temperatura virtual en la columna atmosférica con un alcance del orden de  $\sim 1500$  m sobre el suelo. Las cuatro fuentes acústicas (reflectores parabólicos) ubicadas en torno a la antena del perfilador de

---

<sup>23</sup> Ver anexo N°8 asociado al Capítulo III “Diagnóstico operacional y recomendaciones ámbito meteorología, Informe Final”, del estudio “Evaluación y propuesta de rediseño de la Red Macam de la Región Metropolitana 2007”.

viento, emiten en los últimos 10 ó 5 minutos al final de cada hora un pulso acústico (~ 140 dB y ~ 2020 - 2100 Hz) dirigido verticalmente a la atmósfera. El radar del perfilador detecta una señal de retrodispersión expresada a través de una variación del índice de refracción del aire, generado a partir de la onda acústica de alta potencia. Midiendo la velocidad de propagación del pulso acústico se puede calcular la temperatura virtual, pues ésta es proporcional al cuadrado de la velocidad de propagación del impulso menos la velocidad del aire vertical (EPA 2000).

La resolución del RASS depende de la longitud de onda del pulso emitido, y en el caso de Santiago se calibró para un rango de 60 m (resolución máxima recomendada). Durante la instalación del equipo en el año 1997, el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile realizó una comparación entre observaciones del LapRass y radiosondeos desarrollados en Santiago, indicando que los perfiles del LapRass son una versión suavizada de la estructura vertical de temperatura entregada por los radiosondeos. Se observó además una tendencia a mostrar perfiles isotérmicos en los primeros 200 m de observación, en particular cuando se observa inversión térmica en superficie, lo que junto al efecto de suavizado, podría significar una subestimación de la disminución de la temperatura con la altura en los primeros 500 m (DGF – U de Chile 1997).

**Cuadro N° 3.2. Especificaciones técnicas generales del Sistema Rass operado en Santiago durante el periodo 1999**

Frecuencia de operación	Típicamente 915 ó 1290 MHz
Altura mínima <sup>1</sup>	120 m
Altura máxima <sup>2</sup>	hasta 1,5 km
Resolución de rango	60, 100, 200, 400 m Configurable en fábrica 45 – 500 m
Precisión de temperatura	1 °C
Período promediable	1 - 60 minutos
Apertura de sistema de sonda radioacústica	1,2 m <sup>2</sup> x 4 fuentes
Frecuencia de audio	1.8 - 4 kHz,  Rango de frecuencia de audio elegida para asegurar el cumplimiento de la ley de Bragg* para las condiciones meteorológicas y la frecuencia de operación del perfilador.  *La ley de Bragg, se utiliza para predecir los máximos de difracción de ondas (en este caso acústicas) y su ángulo de difracción.

Fuente: User's Guide Lap-3000

Las observaciones de temperatura virtual mejoran si la atmósfera es más turbulenta, cálida y húmeda, debido a una mejor propagación de la señal acústica o menor atenuación de ella. El viento fuerte también puede afectar las estimaciones de temperatura debido a ecos en superficie o debido a un desplazamiento del pulso acústico fuera del rango de recepción del radar (User's Guide Lap-3000).

### **3.1.2. Porcentaje mensual de datos horarios y perfiles de Temperatura Virtual**

El cuadro 3.3 muestra un detalle de la disponibilidad mensual de datos de temperatura virtual (Tv) por hora y altura para el año 1999. Se observa que para el espesor de interés entre los meses de abril-agosto, el nivel de completitud alcanza el rango de 87 al 96%.

**Cuadro N°3.3 Porcentaje mensual datos de Temperatura Virtual (Tv) observados por el LapRass para el espesor 110-1010m, período 1999**

Niveles de observación LapRass	% de Datos de Temperatura LapRass periodo 1999											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
n01 = 110 m	30,9	82,6	88,6	87,5	90,7	90,3	90,9	94,7	94,9	95,0	95,3	22,3
n02 = 170 m	31,5	84,7	91,1	91,5	95,3	93,3	95,0	93,7	96,3	96,4	95,8	22,6
n03 = 230 m	31,7	85,1	91,4	91,8	90,7	93,3	95,6	93,8	96,3	96,5	96,0	22,4
n04 = 290 m	31,9	85,3	91,3	92,1	90,7	93,2	96,0	94,0	96,4	96,4	96,1	22,3
n05 = 350 m	31,7	85,6	91,3	92,1	90,7	93,3	96,0	94,1	96,4	96,6	96,4	22,4
n06 = 410 m	31,6	85,7	91,1	92,2	90,7	93,3	96,0	94,4	96,5	96,8	96,5	22,6
n07 = 470 m	31,7	85,6	91,4	92,4	90,7	92,5	96,0	94,5	96,5	96,8	96,5	22,6
n08 = 530 m	31,9	85,7	91,4	92,2	90,7	92,4	96,0	94,2	96,4	96,8	96,3	22,6
n09 = 590 m	31,7	85,1	91,4	92,2	90,7	92,4	96,2	94,2	96,5	96,8	96,0	22,3
n10 = 650 m	31,9	85,4	91,4	92,1	95,3	92,4	96,2	93,8	96,4	96,8	96,1	22,2
n11 = 710 m	31,9	85,4	91,4	91,9	95,3	92,4	96,2	93,7	96,4	96,6	96,4	22,2
n12 = 770 m	31,9	85,6	91,4	91,3	95,2	92,1	96,0	92,9	96,1	96,6	96,3	22,0
n13 = 830 m	31,9	85,6	91,4	90,4	95,2	91,3	95,2	92,2	96,1	96,6	96,3	21,8
n14 = 890 m	31,7	85,1	91,1	88,6	94,5	90,1	92,3	90,7	95,4	96,8	96,1	21,2
n15 = 890 m	31,7	85,1	90,9	86,1	93,1	87,8	88,3	89,2	93,3	96,1	96,3	20,3
n16 = 1010 m	31,9	84,7	90,6	82,5	90,9	85,0	84,1	86,4	89,7	95,0	96,1	19,5

Fuente: Elaboración propia a partir de la inspección de datos LapRass 1997-2000.

Considerando que el nivel inferior de observación del equipo n1 es 110m y el nivel superior de interés es n ~ 1000m, se tiene que un perfil vertical completo para Tvc cada 60m debe tener al menos 16 niveles (un dato por nivel) incluido el nivel base n1. La figura N°3.2, muestra un histograma del número de datos horarios por perfil para la Tvc. Se observa que la mediciones de temperatura presentan cerca de un 77% de perfiles óptimos de 16 datos por perfil, alcanzando más de un 80% si se consideran hasta 12 datos por perfil.

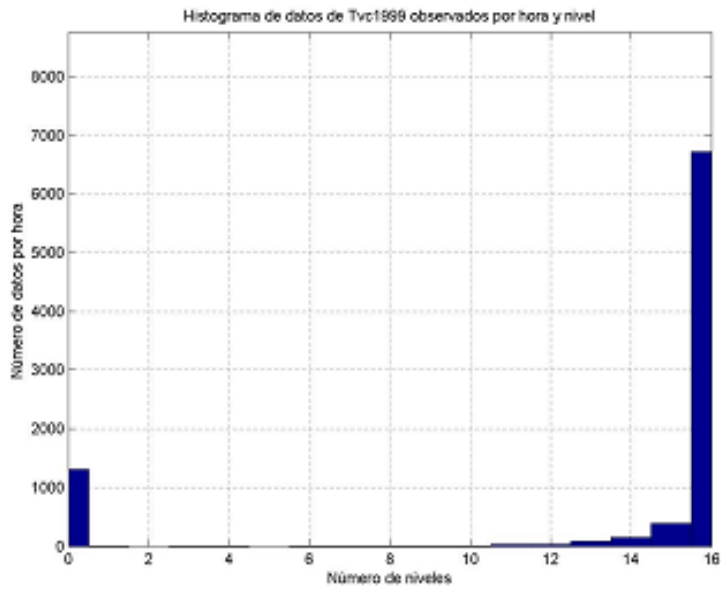


Figura N°3.2. Histograma de los datos horarios de temperatura (TVc) por perfil.

### 3.2. Series de temperatura Torre La Platina, Torre Entel y Estación Lo Prado

#### 3.2.1. Torre La Platina

Para la evaluación de la estabilidad superficial se usó la información de temperatura levantada desde la estación de la Torre La Platina (652 msnm) durante el periodo de interés, y que se ubica a unos 200m del perfilador LapRass, en las mismas dependencias del Centro La Platina. La Torre La Platina entrega datos de temperatura observados a 2 m y mediciones de diferencia de temperatura entre niveles de 2 m y 8 m ( $\Delta T_8$ ) y entre los niveles de 8 m y 22 m ( $\Delta T_{22}$ ).



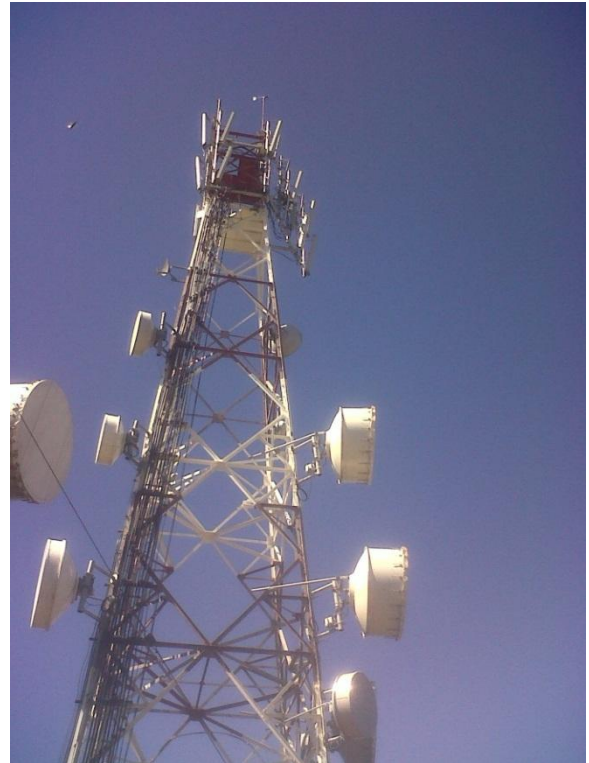
**Figura N°3.3.** Emplazamiento de la Torre de 24 m en el Centro La Platina, zona Sur de la Región Metropolitana. La Platina se ubica en la Av. Santa Rosa N°11.610, paradero 33 comuna de La Pintana.

### **3.2.2. Torre Entel y estación Lo Prado**

Se contó además con información de temperatura para el periodo de interés desde las estaciones de Torre Entel y Lo Prado. La estación de Lo Prado se ubica a 1065 msnm en la zona poniente de la ciudad a 32 km de la Platina, específicamente en el cerro San Francisco sobre túnel Lo Prado (cordillera costera). La estación Torre Entel, se ubica en el centro de la ciudad a una altura del orden de los 681 msnm, y a ~120 m sobre el nivel de la calle. La Torre Entel se encuentra a ~ 14 km al norte de la estación La Platina.



**Figura N°3.3a** Emplazamiento de la estación en la sexta plataforma de la Torre Entel a unos 120 m sobre el centro de Santiago, Av. Libertador Bernardo O'Higgins N°1409.



**Figura N°3.3b** Emplazamiento de la estación Lo Prado ~ 400 m (1065 msnm) sobre el acceso al Túnel Lo Prado, Fundo Lo Aguirre en el Cerro San Francisco.

En el cuadro 3.4 adjunto, se indica el porcentaje de completitud para los datos mensuales de temperatura observada en las estaciones de Torre La Platina, Lo Prado y Torre Entel. Se observa un alto porcentaje de datos disponibles.

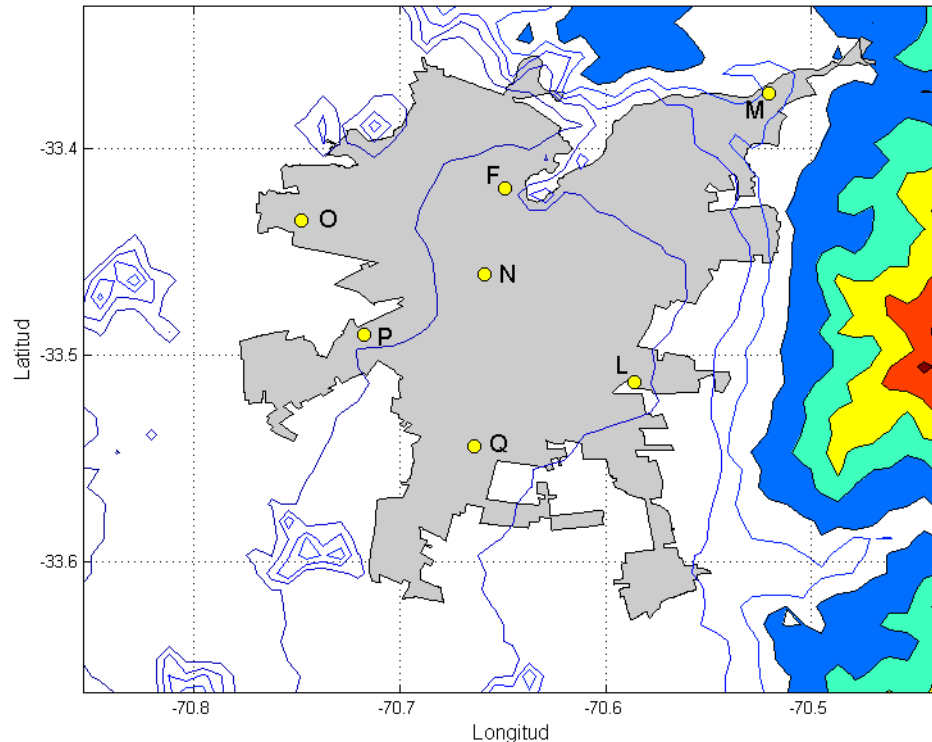
**Cuadro N°3.4 Porcentaje de completitud mensual datos de Temperatura observados para el periodo 1999, estaciones La Platina, Lo Prado y Torre Entel**

Estación	Temperatura, % de datos para el periodo 1999											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
La Platina, Temp. 2 m	100	100	100	99,7	99,9	100	95,6	100	100	100	100	27,7
La Platina, Temp. 8 m	100	99,8	99,6	99,7	99,9	100	95,6	100	99,9	100	100	27,5
La Platina, Temp. 22 m	100	99,7	100	99,6	99,7	100	95,4	98,9	99,9	100	100	27,5
Lo Prado	99,7	100	99,9	99,7	99,4	99,1	99,5	99,4	99,7	99,7	100	99,9
Torre Entel	100	100	99,6	98,9	99,7	99,9	99,7	99,7	99,7	100	100	99,9

Fuente: Elaboración propia a partir de la inspección de datos La Platina, Lo Prado y Torre Entel 1999.

### 3.2.3. Temperatura y Material Particulado (MP10) en la Red Macam

Con el objeto de evaluar la variabilidad espacial de la temperatura superficial en los siete puntos de medición ubicados en distintos lugares del Gran Santiago se utilizó la información de temperatura de la red oficial de calidad del aire (figura N°3.5). Cabe indicar que la información del periodo de interés tal como lo reportó el operador no cuenta con una validación<sup>24</sup>.



**Figura N°3.4** Distribución de las estaciones de monitoreo de Material Particulado en la Región Metropolitana (Red Macam). Estaciones La Paz (F), La Florida (L), Las Condes (M), Pudahuel (O), Cerrillos (P) y El Bosque (Q). Fuente: Departamento de Planes, Ministerio del Medio Ambiente

Los datos de temperatura de la Red Macam obtenidos desde el sistema Airviro fueron transferidos a formato Matlab con el objeto de realizar una inspección individual de las series de

<sup>24</sup> En lo que respecta al levantamiento de las variables meteorológicas, la Red MACAM no describe la aplicación de procedimientos de validación de los datos meteorológicos observados, presentando un grado de confiabilidad asociado solo a las mantenciones periódicas y calibraciones de los instrumentos (ver Capítulo III Diagnóstico operacional y recomendaciones ámbito meteorología, Informe Final, evaluación y propuesta de rediseño de la Red Macam de la Región Metropolitana).



datos horarios crudos<sup>25</sup>. Se detectó la existencia de datos anómalos (aparentemente no físicos) y claramente fuera de rango, por lo que se hizo una validación básica de las series de temperatura basándose en los siguientes pasos y criterios:

- 1) **Revisión de datos con resolución de 5 minutos:** Con el objetivo de minimizar la pérdida de datos horarios se trabajó con los datos de mayor resolución disponibles, en este caso de resolución de 5 minutos.
- 2) **Inspección de periodos sin datos:** En general se observó pérdida de datos sólo en dos estaciones, en algunos días a fines del mes de febrero para la estación L (La Florida) y en algunos días a mediados del mes de agosto para la estación N (Parque O'Higgins).
- 3) **Eliminación de datos fuera del rango:** Se procedió a eliminar datos fuera de rango considerando como límites los valores de  $-5^{\circ}\text{C} < T^{\circ} < 35^{\circ}\text{C}$ . Donde el límite inferior es un grado menor al valor de la temperatura mínima de  $-4^{\circ}$  observada durante el año 1999 en la estación climatológica de Pudahuel y el valor máximo corresponde a poco más de un grado de la temperatura máxima de  $33,8^{\circ}\text{C}$  observada en la estación de la Quinta Normal, en el centro de Santiago, ambas administradas por la Dirección Meteorológica de Chile (ver tabla 3.5).

**Cuadro N°3.5 Valores Climatológicos de Temperatura, estación Pudahuel para la Región Metropolitana periodo 1999**

Estación Pudahuel (Lat. 33°23' / Long. 70°47') altura 475 msnm					
Mes	Temperaturas Medias °C			Temperaturas extremas °C	
	T°máx	T°mín	T°mes	Tmáx/día	Tmín/día
Julio	15,6	1,2	7,0	25,0/27	-4/15

Estación Quinta Normal (Lat. 33°26' / Long. 70°41') altura 520 msnm					
Mes	Temperaturas Medias °C			Temperaturas extremas °C	
	T°máx	T°mín	Tmes	Tmáx/día	Tmín/día
Enero	29,0	13,1	20,4	33,8/24	10,8/12

Fuente: Dirección Meteorológica de Chile, Anuario Meteorológico 1999.

<sup>25</sup> La lectura de "datos crudos" o datos desde la fuente original, se denomina validación "nivel 0" y se considera un paso preliminar y necesario para iniciar una revisión cuantitativa y cualitativa orientada a evaluar la representatividad física de los datos y su consistencia interna denominada de nivel 1.

- 4) **Revisión de datos anómalos:** Con el objeto de realizar una revisión individual de las series horarias de temperatura en busca de datos no atribuibles a efectos físicos, se evaluó la diferencia entre los valores sucesivos de cada serie de temperatura, definiendo como valor dudoso, cuando la diferencia de valores  $\Delta T > 3^{\circ}\text{C}$ . El valor de  $3^{\circ}\text{C}$  se ha considerando razonable ya que los valores de  $\Delta T$  en las series son en promedio del orden de  $\sim 2^{\circ}\text{C}$ .
- 5) **Recuperación de series horarias:** A partir de las series de 5 minutos depuradas, se reconstituyeron las series de temperatura horaria.

En el cuadro 3.6, se presenta el nivel de completitud de los datos meteorológicos de resolución horaria para la Red Macam durante el periodo 1999.

**Cuadro N°3.6 Porcentaje de completitud mensual datos de Temperatura Red Macam**

Estación	Temperatura, % de datos para el periodo 1999											
	Ene	Feb	mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
La Paz (L)	96,9	96,6	96,9	93,1	95,8	96,8	96,9	96,9	96,8	96,9	96,8	96,9
La Florida (F)	79,6	96,6	96,8	94,9	91,1	96,3	96,9	96,9	95,6	96,6	96,8	96,9
Las Condes (M)	96,9	95,4	96,9	96,4	96,8	96,5	96,9	96,9	94,3	96,8	96,5	96,9
Parque O'Higgins (N)	96,9	93,2	96,6	94,4	96,8	93,8	96,5	73,1	96,8	95,2	96,8	96,9
Pudahuel (O)	96,9	96,6	96,9	93,6	96,8	96,1	96,9	96,9	95,0	95,7	94,7	96,9
Los Cerrillos (P)	79,2	96,6	96,9	96,8	96,9	96,8	96,9	96,9	94,0	96,9	96,8	96,9
El Bosque (Q)	96,9	96,6	96,9	92,8	96,6	95,7	96,9	96,9	96,8	96,9	96,8	96,9

Fuente: Elaboración propia a partir de la inspección de datos de temperatura Red Macam 1999.

## **4. Resultados**

### **4.1. Variabilidad de la temperatura en superficie y altura sobre Santiago**

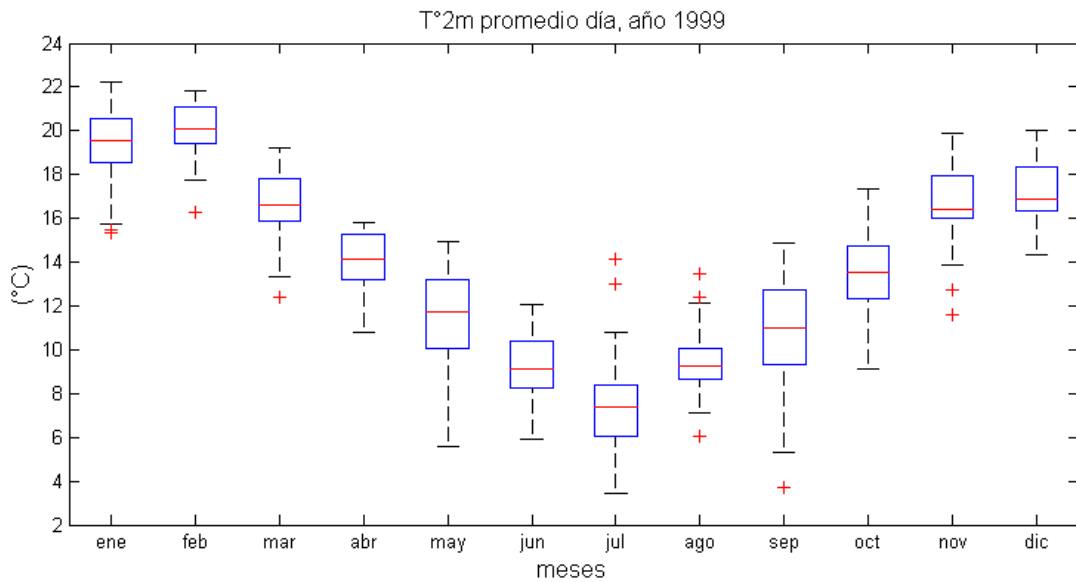
Se presenta a continuación una caracterización de la variabilidad de la temperatura en superficie y en altura en la cuenca de Santiago para el año 1999 observada en la La Platina (Torre La Platina y perfilador LapRass). Se describe en cada caso, el ciclo anual, los ciclos diarios y la variación interdiaria de las temperaturas. Se distingue para algunos análisis entre un periodo definido como cálido (enero-marzo y septiembre-diciembre) y un periodo definido como frío (abril-agosto), siendo este último el periodo en que se observan mayoritariamente los episodios de contaminación atmosférica por material particulado.

#### **4.1.1. Variabilidad de la temperatura superficial**

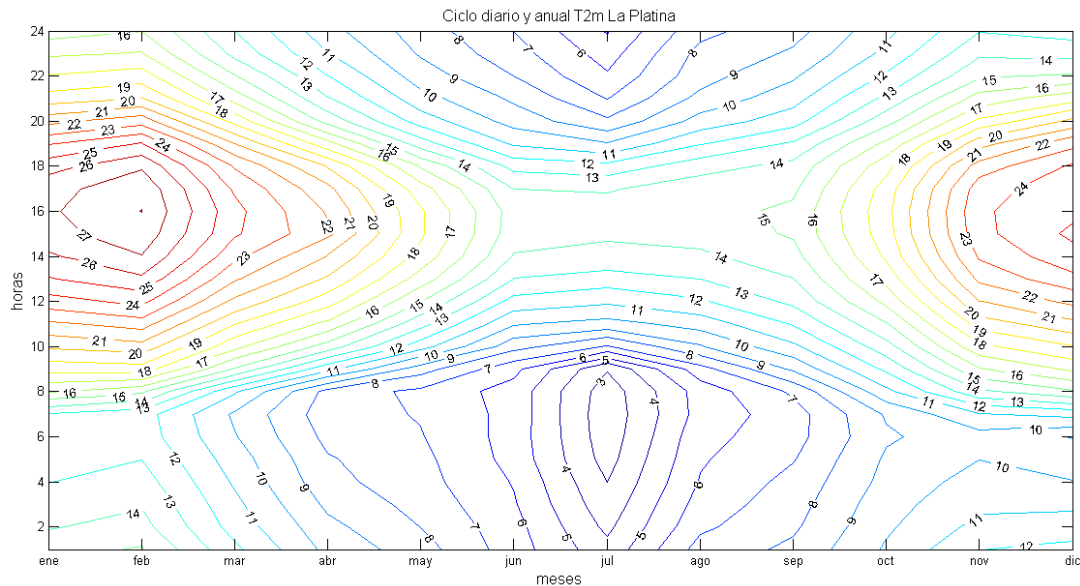
La Torre meteorológica de La Platina es utilizada para representar la temperatura en los primeros metros de la superficie. En la figura 4.1 se presenta la variabilidad mensual de las distribuciones de frecuencia de la temperatura media diaria al nivel de 2 m durante 1999. Se observan algunos días con temperaturas medias diarias atípicamente cálidas en los meses de julio y agosto. Alcanza valores medianos de 20°C entre enero y febrero y de ~ 8°C durante julio el mes más frío. Se observa que en general, la variabilidad mensual de los promedios diarios es relativamente uniforme, con rangos intercuartílicos del orden de 2,5 a 4°C.

En la figura 4.2, el ciclo medio diario y anual de la temperatura muestra que las temperaturas mínimas se registran cerca de las 06 HL en los meses cálidos y cerca de las 07 HL durante el periodo frío, mientras que el máximo promedio mensual se registra en torno a las 16 HL durante todo el año. La temperatura máxima promedio se registró el mes de febrero (~28°C) y la mínima en julio, ~ 3°C. Se aprecia una amplitud térmica diaria en los meses de verano (enero, febrero y diciembre) del orden de ~13°C y del orden de ~ 10°C en los meses de junio y julio. Esta mayor amplitud térmica del periodo cálido se explica por la variación estacional de las horas de Sol, lo que resulta además, en anomalías negativas (~ - 6°C) al amanecer del periodo cálido más intensas respecto al amanecer del periodo frío (~ 4°C), ver Figura 4.3. Es importante indicar que la información analizada corresponde sólo al año 1999, por lo que no se puede establecer periodo que estuvo bajo efectos climatológicos del evento La Niña, donde el

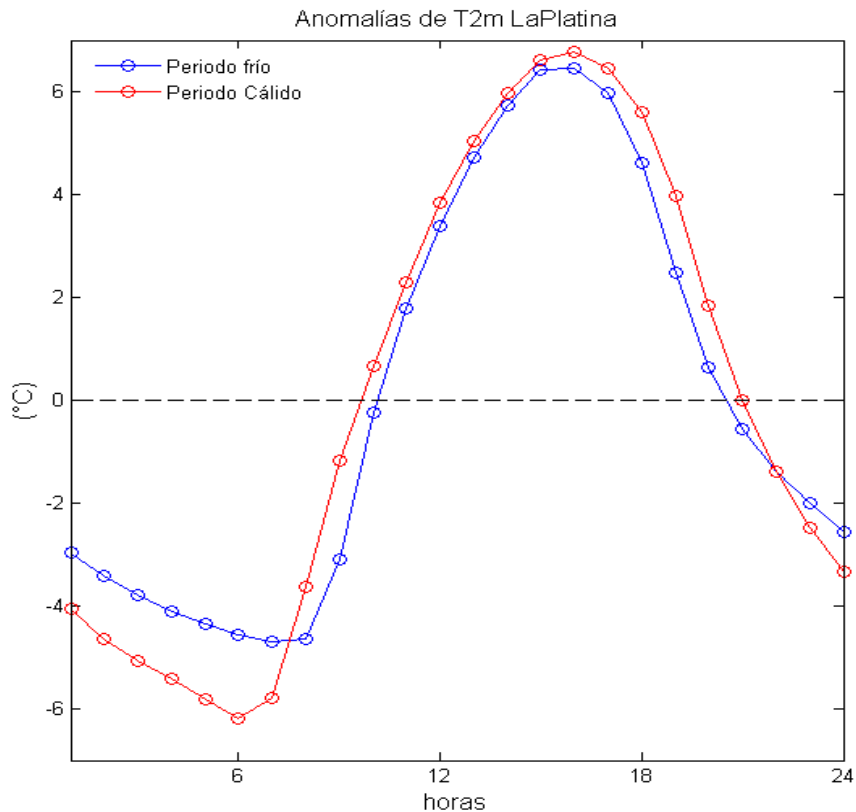
mes de mayo se observó anormalmente cálido, mientras que junio, julio y agosto fue indicado como anómalamente frío (ver capítulo 1, subsección 1.3.2).



**Figura 4.1.** Variabilidad mensual de la temperatura media diaria superficial a 2 m en la Torre La Platina para el año 1999. El diagrama de cajas rectangulares se extiende entre los cuartiles inferior y superior de cada distribución, y las líneas horizontales dentro de las cajas indican la ubicación de la mediana. Las líneas verticales segmentadas fuera de las cajas muestran el alcance de los datos. Los datos de más de 1,5 veces el rango intercuartílico desde el cuartil superior o inferior, son considerados un valor atípico y se representan de forma individual con una cruz.



**Figura 4.2.** Ciclo diario y anual promedio de la temperatura superficial a 2 m en la Torre La Platina para el año 1999. Contornos en grados Celsius (°C).



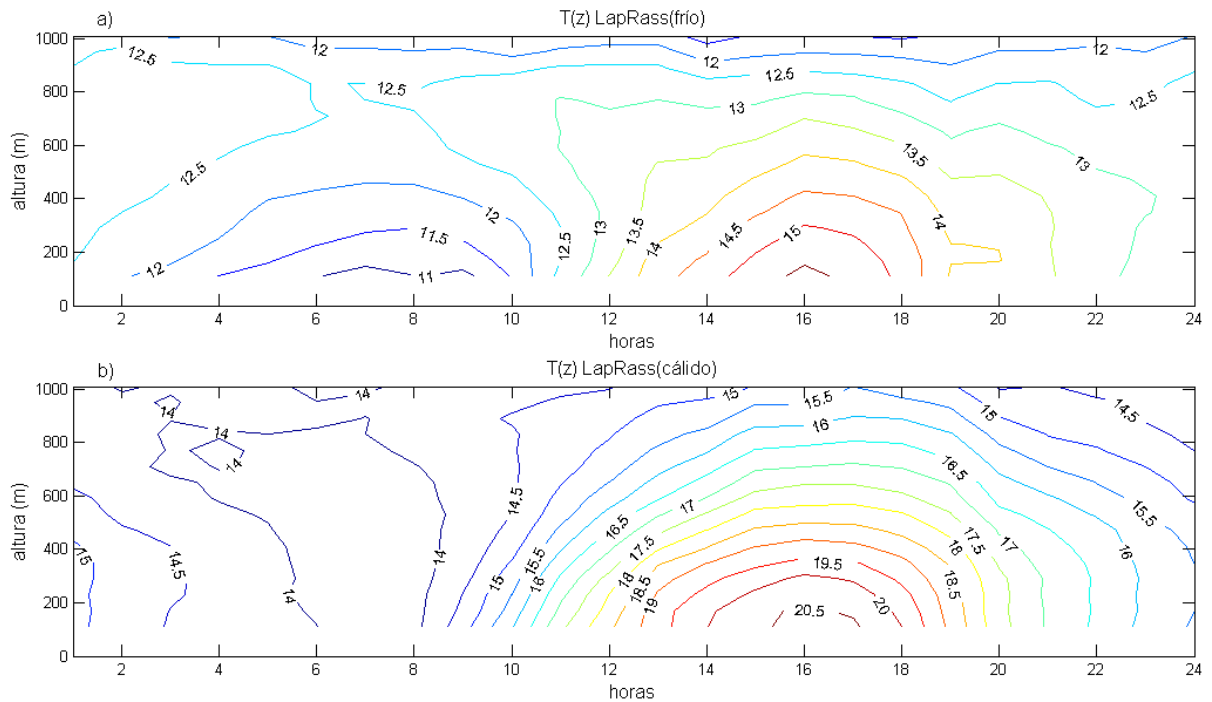
**Figura 4.3.** Ciclo diario promedio de anomalías de temperatura superficial a 2 m respecto del periodo frío (azul) y periodo cálido (rojo) para la Torre La Platina año 1999.

#### 4.1.2. Variabilidad de la temperatura en la columna atmosférica sobre La Platina

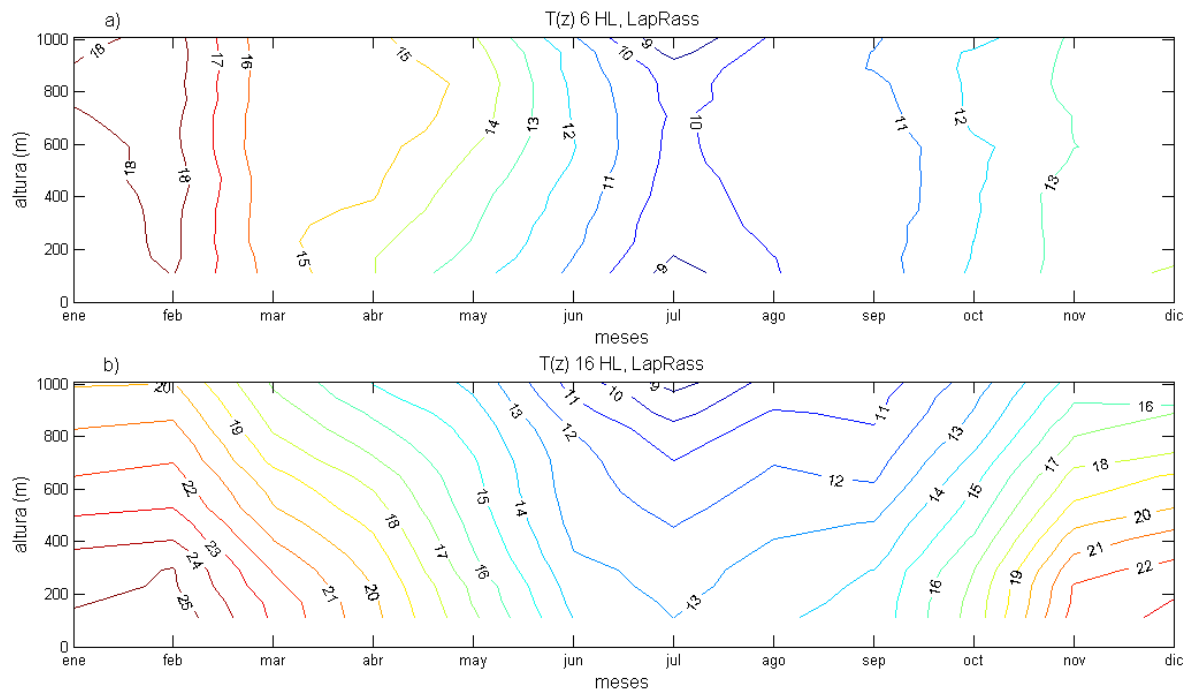
La figura 4.4 muestra para el periodo cálido y frío, el ciclo diario medio de la temperatura observada en la columna atmosférica comprendida entre los 110 y los 1010 m, que fue monitoreada por el perfilador. Se observa que durante el periodo frío (Figura 4.4a), se desarrolla una inversión térmica bien definida entre los 110 m y 800 m que se mantiene durante la noche, alcanzando mayor intensidad entre las 07 y 08 HL. La base del espesor monitoreado alcanza una temperatura de 11°C al final de la noche mostrando un suave aumento en altura llegando a ~13°C a los 500 m, manteniéndose relativamente isotérmico en el espesor superior. El efecto diurno muestra una temperatura máxima de ~15.5°C cerca de los 100 m a las 16 HL. El efecto del calentamiento diurno durante el periodo frío alcanza en promedio un nivel cercano a los 700 m, a diferencia del periodo cálido donde el efecto del calentamiento se expresa sobre los 1000 m (Figura 4.4b). Durante el periodo cálido las temperaturas medias nocturnas muestran un perfil vertical muy isotermal, y se mantienen en torno a los 14°C hasta el final de la

noche. Después del medio día, el nivel inferior de la columna alcanza un máximo promedio de 21°C a las 16 HL, decreciendo rápidamente en altura alcanzando ~18.5°C a los 500 m sobre la superficie y ~15.5°C cerca de los 1000 m.

Considerando que la inversión térmica observada durante el periodo nocturno se intensifica al final de la noche, en contraste con el efecto convectivo del periodo diurno, es de interés observar la variación estacional del perfil vertical de temperatura al amanecer y durante la tarde. Para esto, en las figuras 4.5a y 4.5b, se muestra la variación mensual de la temperatura en la columna atmosférica a las 06 y 16 HL. Se observa que a las 06 HL domina una condición isotermal entre los meses de febrero y marzo, en todo el espesor de estudio (Figura 4.5a). Entre marzo y abril se observa un cambio en el perfil con un máximo de temperatura entre los 600 y 900 m (~ 15.5°C) que se traduce en una inversión térmica entre los 100 y 600 m. Esta inversión de temperatura se mantiene hasta el mes de julio. Llama la atención un enfriamiento sobre los 800 m durante el mismo mes. A partir de agosto se observa un nuevo máximo de temperatura centrado en torno a los 600 m (~10.5°C), propiciando bajo dicho nivel una inversión térmica de menor intensidad que el observado en los meses de otoño-invierno. Esta inversión de temperatura comienza a desaparecer a partir del mes de septiembre modificando nuevamente el perfil vertical de temperatura que se vuelve prácticamente isotérmico. En contraste con lo observado en la madrugada, el perfil promedio de las 16 HL muestra el efecto del calentamiento superficial disminuido durante el mes de julio (periodo frío) y es claramente más intenso en los meses del periodo cálido (Figura 4.5b).



**Figura 4.4.** Ciclo diario medio de la temperatura en la columna atmosférica sobre la estación de La Platina para el año 1999, a partir de datos del perfilador. a) Ciclo diario periodo frío y b) Ciclo diario periodo cálido. Contornos en grados Celsius (°C).



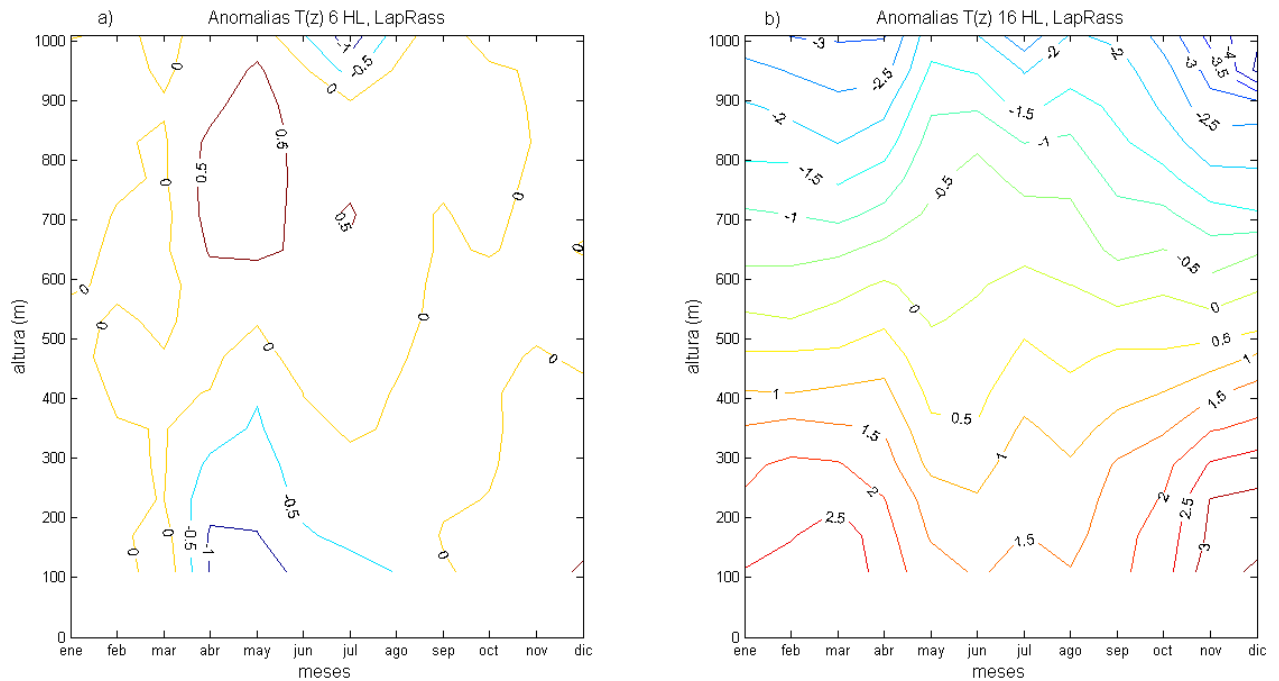
**Figura 4.5.** Ciclo medio anual de temperatura en la columna vertical para el periodo 1999 con datos del perfilador en la estación de La Platina. a) Ciclo al final de la noche, 06 HL. b) Ciclo durante la tarde, 16 HL. Contornos en grados Celsius (°C).

Una revisión de las anomalías de temperatura respecto del promedio en la vertical de las 06 HL y 16 HL (Figura 4.6), confirma que durante el periodo cálido al amanecer, el espesor es isotermal, mientras que el periodo frío se caracteriza por la presencia de una inversión térmica (Figura 4.6a) favorecida por un enfriamiento (anomalías negativas del orden de  $\sim -1^{\circ}\text{C}$ ) bajo los 400 m y un calentamiento relativo entre 600 y 950 m (anomalías positivas  $\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ ). A las 16 HL el ciclo anual de las anomalías presenta valores negativos sobre los 550 m y positivos bajo dicho nivel. Las anomalías negativas se intensifican en altura en los meses cálidos de noviembre y diciembre especialmente cerca de los 1000 m ( $\sim -4^{\circ}\text{C}$ ). Las anomalías positivas también se intensifican durante los meses cálidos, alcanzado los valores máximos bajo los 300 m entre los meses de marzo y abril, y entre octubre y noviembre (Figura 4.6b).

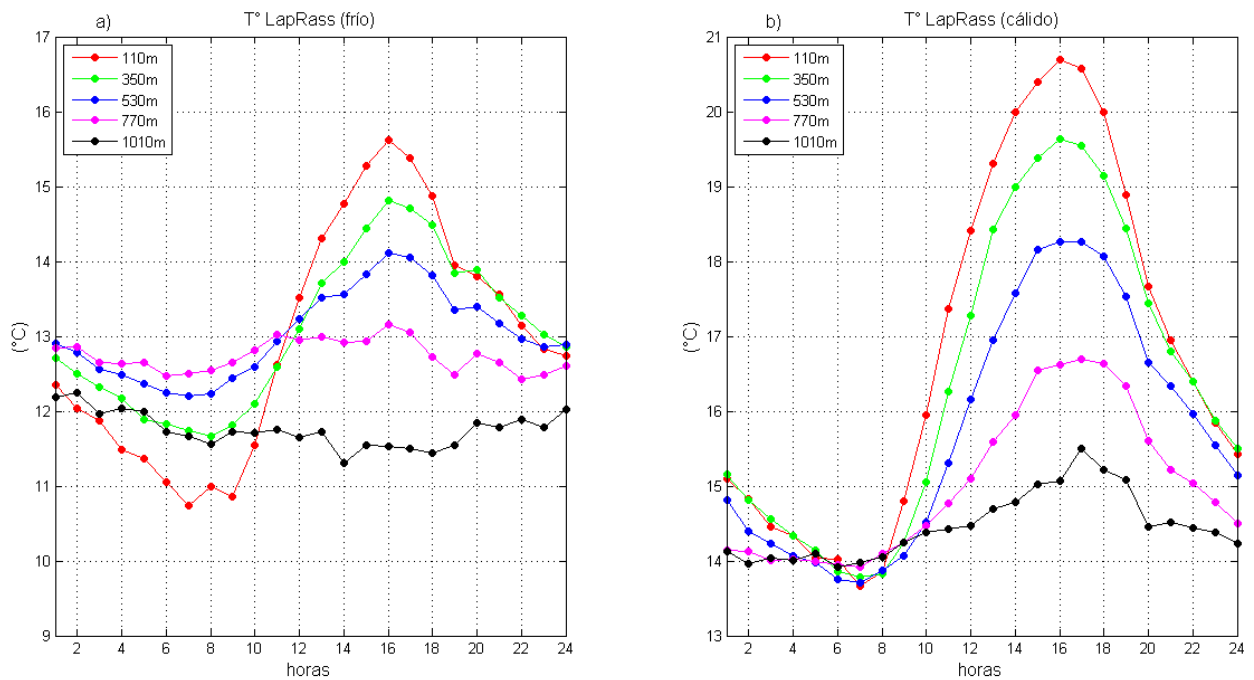
Con el propósito de evaluar más detalladamente el ciclo diario promedio para los periodos frío y cálido (Figuras 4.7a y 4.7b), se seleccionan cinco niveles del perfilador para representar los niveles bajos, medios y altos del espesor monitoreado por éste (110 m, 350 m, 530 m, 770 m y 1010 m). Se observa nuevamente la inversión térmica nocturna en el periodo frío y su intensificación entre las 07 y 09 HL. Llama la atención la hora en que se observa la temperatura mínima promedio, que parece estar desfasada en los distintos niveles. En el periodo cálido en cambio, la temperatura mínima se observa claramente a las 07 HL con valores similares en toda la columna, lo que se explica debido a la condición isotérmica descrita precedentemente. Respecto a las temperaturas máximas, el contraste entre el periodo frío y cálido es evidente. Se observa que el máximo calentamiento superficial en el periodo frío se registra a las 16 HL y parece no afectar el nivel de 1010 m, mientras que en el periodo cálido dicho nivel muestra un máximo de temperatura a las 17 HL. La marcada diferencia del ciclo medio diario entre el periodo frío y cálido, así como las diferencias observadas en el ciclo anual, son de gran importancia en la estabilidad de la tropósfera baja, debido a que el calentamiento o enfriamiento sobre la capa límite se expresará en un mayor o menor desarrollo de la altura de capa de mezcla. La altura de la capa de mezcla es relevante en la remoción de contaminantes desde la superficie de la cuenca (ver por ejemplo Muñoz y Undurraga 2010). La altura de la capa de mezcla en general presenta variabilidad anual, también a escala sinóptica y a escala horaria, siendo controlada principalmente por el balance de energía en superficie, la estabilidad, vientos en niveles bajos, fenómenos de subsidencia y advecciones horizontales (Stull 1988). En particular, la variabilidad sinóptica está asociada como se indicó en la sección 2, a la presencia de una inversión térmica por subsidencia que en el caso de la cuenca de Santiago, mantiene una condición de gran estabilidad especialmente en el periodo invernal, donde la intensificación



de la subsidencia y la estabilidad nocturna observada bajo condiciones de flujo de dorsal en altura y desarrollo de vaguada costera en superficie, se traducen en capas de mezcla someras.



**Figura 4.6.** Anomalías de temperatura en la columna vertical atmosférica observada por el perfilador para el año 1999. a) Anomalías de temperatura para el final de la noche 06 HL. b) Anomalías durante la tarde 16 HL.



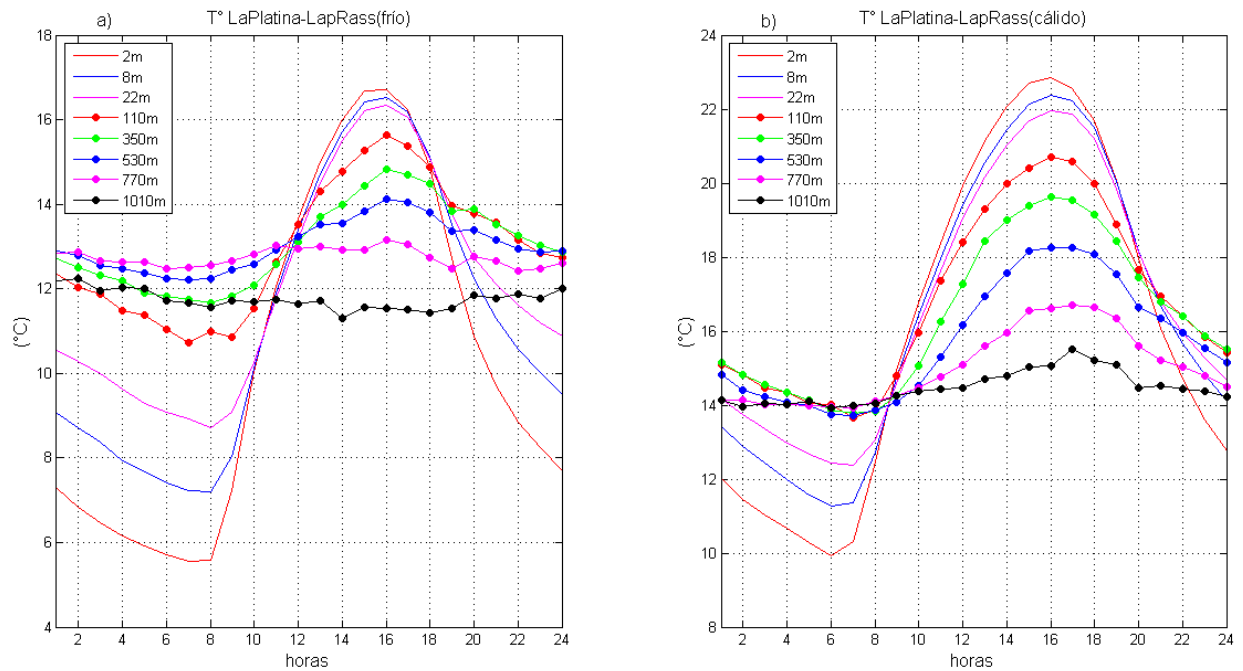
**Figura 4.7.** Ciclo diario promedio de temperatura para distintos niveles obtenidos por el perfilador para el periodo 1999. Ciclos diarios periodo cálido (a) y frío (b).

### 4.1.3. Relación entre temperatura superficial y en la columna atmosférica

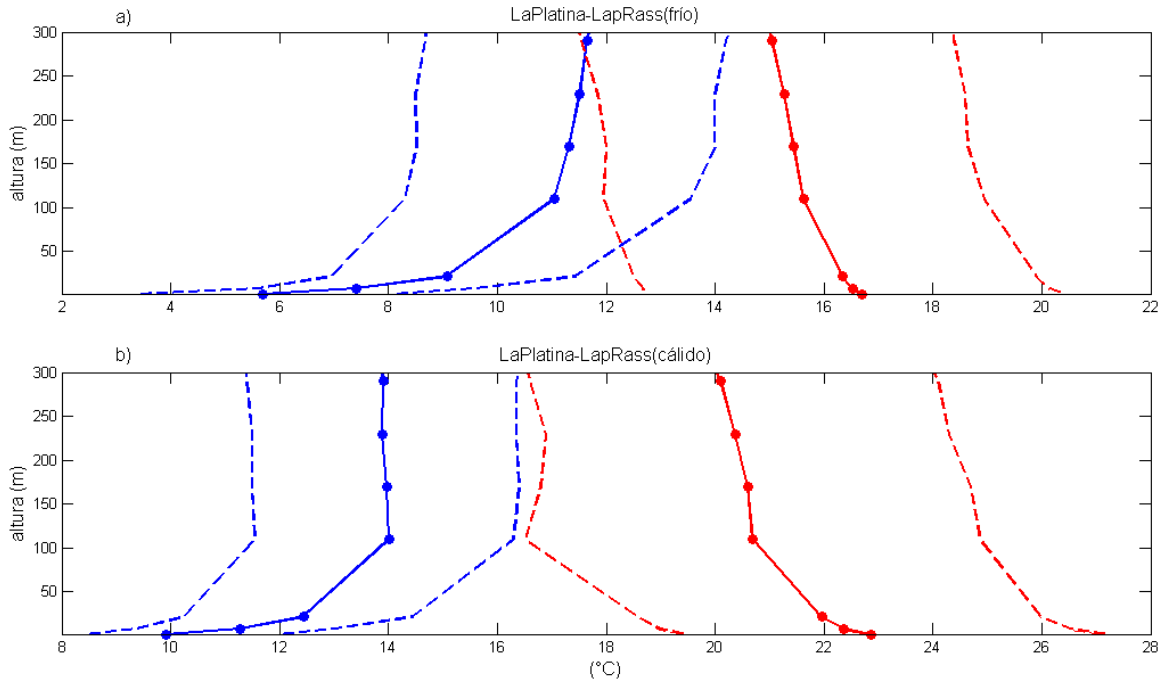
En el presente apartado, se realiza una caracterización del perfil vertical de temperatura para la cuenca de Santiago utilizando conjuntamente los datos superficiales obtenidos desde la Torre La Platina y las observaciones realizadas desde el perfilador. En la figura 4.8 se muestran los ciclos diarios promedio de series de temperatura, tanto para el periodo frío como para el cálido. Se observa que al agregar las temperaturas de los niveles superficiales de la Torre La Platina (2, 8 y 22 m), aparece durante la noche, y en ambos periodos, una inversión de temperatura superficial ( $\Delta T > 0$ ) que alcanza su máxima magnitud cerca de las 08 HL en el periodo frío y a las 06 HL en el periodo cálido. En el periodo estival, la inversión térmica nocturna se comienza a configurar después de las 20 HL, 2 horas después que en el periodo frío, siendo además menos intensa. Mientras que en el periodo frío a la hora de la máxima estabilidad la inversión térmica se observa desde superficie hasta los 500 m, en el periodo cálido se observa solo en los primeros 20 m, ya que cerca de las 05 HL el espesor entre 110 y 1010 m se vuelve isotermal, hasta que cerca de las 09 HL se observa un rápido cambio del perfil vertical dando paso al desarrollo de la capa límite convectiva.

En la figura 4.9 se muestra la variación vertical de temperatura para los primeros 300 m, a las 06 y 16 HL para los periodos frío y cálido, agregando su variabilidad intercuartílica. En ambos periodos los perfiles superficiales se observan bien definidos y con un marcado ciclo diario. El perfil de las 06 HL en ambos casos muestra el desarrollo de una inversión de temperatura superficial de tipo radiativo, lo que es consistente con lo observado en un valle interior como es el caso de la cuenca de Santiago. El rango de variación intercuartílica de las 06 HL del periodo frío es del orden de  $\sim 4.7^{\circ}\text{C}$  y de  $\sim 3.5^{\circ}\text{C}$  para el periodo cálido. El rasgo más notorio que diferencia los periodos se manifiesta en un cambio del perfil promedio sobre los 100 m que en el periodo frío mantiene la inversión térmica hasta niveles superiores aunque con una pendiente más suave (Figura 4.9a), mientras que en el periodo cálido el perfil a partir de los 100 m se vuelve rápidamente isotérmico. Los perfiles de las 16 HL, en ambos periodos muestran mayor temperatura en superficie que en niveles más altos, lo que da cuenta del calentamiento superficial y la desaparición de la inversión radiativa en el transcurso del día. El periodo cálido (Figura 4.9b) como es esperable, presenta temperaturas más altas en superficie lo que define un perfil superficial inestable en la tarde más intenso en comparación con el periodo frío. El rango de variación intercuartílica de las 16 HL durante el periodo frío y cálido es del orden de  $\sim 7.7^{\circ}\text{C}$ .

Un aspecto de interés es la gran congruencia que presentan los datos superficiales observados en la Torre de la Platina con los datos observados en el perfilador. Se aprecia que el perfil generado a partir de los datos existentes es bastante razonable, considerando que en el espesor que separa observaciones de temperatura a los 22 m de altura en la Torre y los 110 m del perfilador, no existen observaciones. Se puede observar por ejemplo, que para el perfil de las 06 HL del periodo frío a los 60 m de altura la temperatura podría ser en promedio de  $\sim 0.5^{\circ}\text{C}$  más cálido de la asumida en el perfil propuesto en la figura 4.9a, lo que en principio podría representar solo la diferencia asociada a las técnicas de monitoreo.



**Figura 4.8.** Ciclo diario promedio de temperatura para distintos niveles obtenidos desde la Torre La Platina y el perfilador para el periodo 1999. a) Ciclo diario periodo frío. b) Ciclo diario periodo cálido.

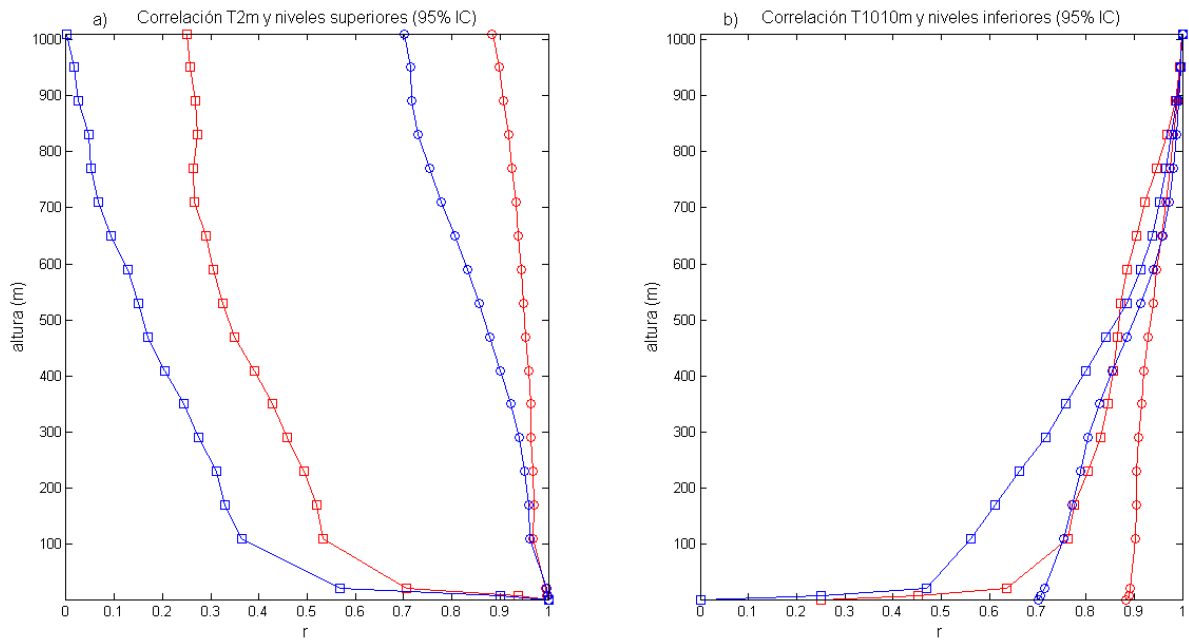


**Figura 4.9.** Perfiles verticales de temperatura media a la 06 (azul) y 16 HL (rojo) para el periodo cálido y frío a partir de datos del perfilador y de la Torre La Platina. a) Perfiles verticales de temperatura para el periodo frío. b) Perfiles verticales de temperatura para el periodo cálido. Las líneas segmentadas representan los rangos intercuartílicos.

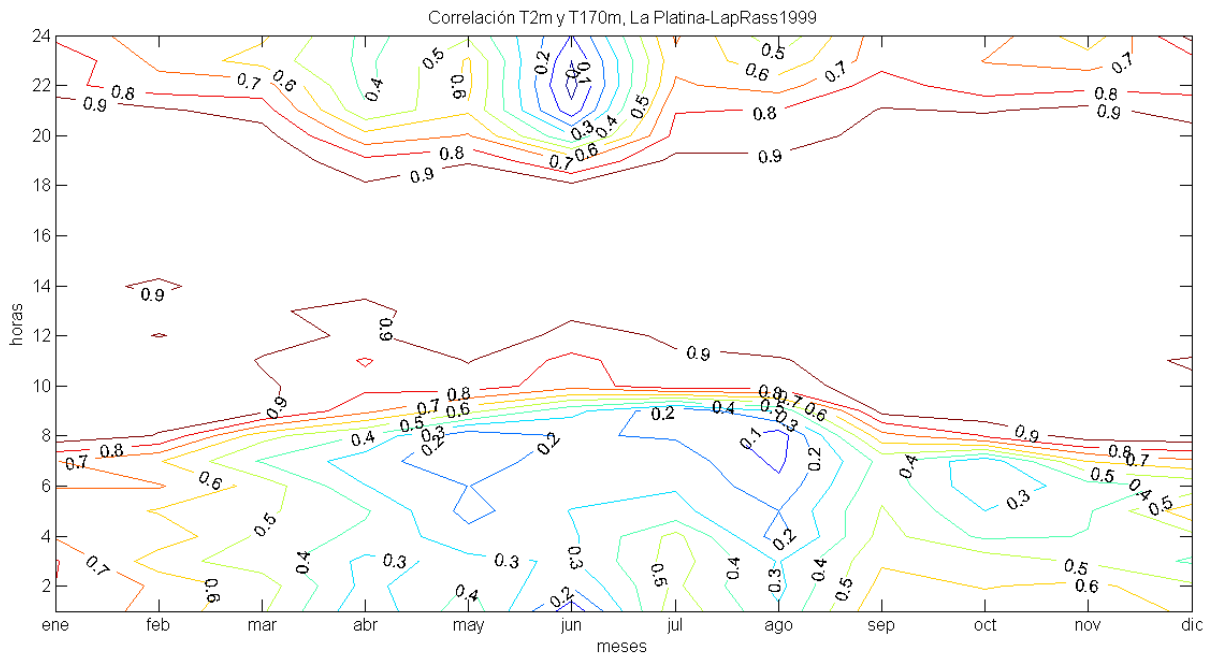
Con el objeto de evaluar la relación a nivel sinóptico e interdiario de la temperatura superficial respecto de las temperaturas observadas en la columna atmosférica, tanto al final de la noche como durante el periodo diurno, se estimó un perfil promedio para las temperaturas observadas entre las 05 y 07 HL para el final de la noche, y un perfil promedio entre las 15 y 17 HL representativo para la tarde. Se eliminó el efecto estacional extrayendo los promedio mensuales y se calculó la correlación entre la temperatura superficial a 2 m y el valor de temperatura de los niveles superiores (Figura 4.10a). Se calculó también la correlación entre la temperatura media a 1010 m y los valores de temperatura de niveles inferiores (Figura 4.10b). Se observa en la Figura 4.10a, que para el periodo cálido, el perfil de la tarde presenta una correlación alta con valores de  $r > 0.9$  hasta una altura superior a los ~ 900 m. Mientras que en el periodo frío la correlación se mantiene con  $r > 0.9$  solo hasta los 300 m, disminuyendo sobre dicho nivel hasta alcanzar un  $r \sim 0.7$  entre los 800 y 1000 m. Lo anterior se puede atribuir a la diferencia de calentamiento diurno entre ambos periodos y por tanto a la efectividad de la mezcla e intercambio vertical asociada el efecto convectivo en la capa límite. Los perfiles del final de la noche, muestran para el periodo frío y cálido una rápida disminución en los primeros 20 m con un  $r \sim 0.5$  cerca de los 100 m para el periodo cálido y  $r \sim 0.3$  para el periodo frío.

Sobre este nivel los valores de  $r$  decrecen progresivamente en altura alcanzando a los 700 m un valor de  $r \sim 0.3$  para el periodo cálido y un  $r < 0.1$  para el periodo frío. Lo anterior indica que al final de la noche para ambos periodos las temperaturas superficiales se independizan de los valores observados a mayor altura, dando cuenta de una capa de aire superficial diferenciable de las capas superiores. Para la correlación de las temperaturas entre el nivel superior  $\sim 1010$  m y los valores inferiores (Figura 4.10b), los perfiles representativos de la tarde se observan bien correlacionados con  $r > 0.9$  hasta los 600. Bajo este nivel, solo el perfil de la tarde del periodo cálido se mantiene con  $r \sim 0.9$  hasta la superficie, mientras que el perfil de la tarde para el periodo frío decrece hasta alcanzar un  $r \sim 0.7$  en el nivel de 100 m. Los perfiles representativos del final de la noche alcanzan en ambos periodos un  $r \sim 0.8$  hasta los 500 m, pero bajo este nivel, la correlación decae fuertemente alcanzado en el perfil frío un  $r \sim 0.5$  a los 20 m y el cálido un valor de  $r \sim 0.6$ . La correlación con el valor superficial es  $r < 0.3$  en el periodo cálido y  $r < 0.1$  para el frío.

Un análisis de la variación diaria y anual de la correlación entre la temperatura superficial a 2 m y la temperatura a 170 m se presenta en la figura 4.11. Se observa que el coeficiente de correlación es alto entre las horas de transición mañana-tarde y tarde-noche ( $r > 0.8$ ). Se observa que entre los meses de marzo y junio, y durante el mes de agosto la correlación decae entre las 01 y 04 HL ( $r \sim 0.3$  y  $0.4$ ). Los valores más bajos ( $r \sim 0.2$  y  $0.1$ ) se observan al final de la noche, en los meses de mayo y agosto, lo que es consistente con los valores observados en la figura 4.10. Lo anterior refuerza la idea de que la temperatura superficial muestra independencia de la temperatura observada en niveles superiores.



**Figura 4.10.** Correlación interdiaria de las temperaturas en la columna vertical para los perfiles medios del periodo cálido (líneas rojas) y frío (líneas azules), de los perfiles medios entre las 5 y 7 HL (cuadrados) y entre las 15 y 17 HL (círculos), a partir de los datos observados en la Torre La Platina y el perfilador LapRass durante el año 1999. En a) Correlación entre temperatura a 2 m y niveles superiores. b) Correlación entre temperatura a 1010 m y niveles inferiores.

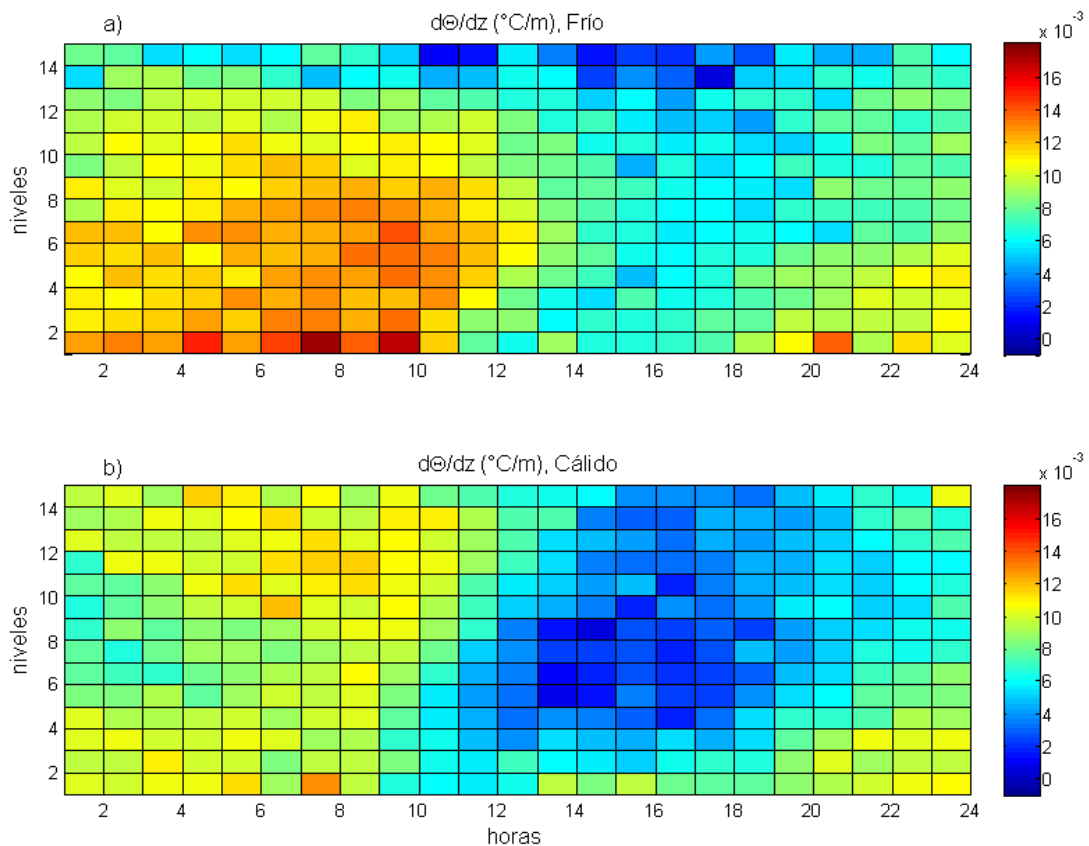


**Figura 4.11.** Variación mensual y correlación interdiaria de la temperatura superficial (T2m) Torre La Platina y la de los primeros niveles observados por el perfilador LapRass (T170m) para el periodo 1999. Contornos en grados Celsius (°C).

## 4.2. Estabilidad atmosférica en la columna vertical sobre La Platina

Una evaluación de la estabilidad de las capas atmosféricas observadas por el perfilador puede realizarse a través del análisis del gradiente vertical de temperatura potencial en el espesor observado, donde  $d\theta/dz < 0$  y  $d\theta/dz > 0$  indica una condición de inestabilidad y estabilidad respectivamente, y  $d\theta/dz = 0$  una condición neutra. Una descripción detallada de los criterios de estabilidad en función de la temperatura potencial se puede encontrar en Rogers y Yau (1989).

En la figura 4.12 se observa que bajo los 1000 m, para ambos periodos la columna es estable durante la noche intensificándose la estabilidad al amanecer, especialmente durante el periodo frío (Figura 4.12a). En el periodo diurno  $d\theta/dz$  se observa también estable en el nivel más bajo, pero con valores cercanos a una condición neutra, lo que es consistente con una capa límite convectiva donde la capa superficial se espera esté bien mezclada (Figura 4.12b).



**Figura 4.12.** Ciclo diario medio del gradiente vertical de temperatura potencial ( $d\theta/dz$ ) en la columna atmosférica sobre la estación de La Platina para el año 1999 a partir de datos del perfilador. a) Ciclo diario para el periodo frío. b) Ciclo diario para el periodo cálido. Unidades en ( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ).

#### 4.2.1. Estabilidad superficial en La Platina

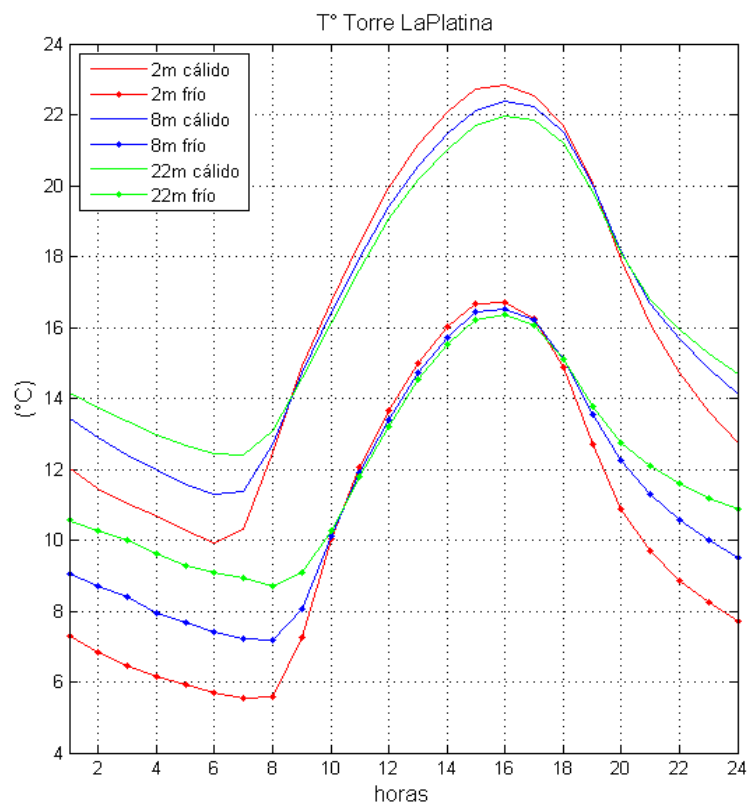
La Torre de La Platina se ha usado en varios estudios para caracterizar la estabilidad superficial sobre Santiago (ver por ejemplo Muñoz 2003 et al; Muñoz et al 2007). En la figura 4.13 se presenta el ciclo diario promedio de las temperaturas a 2, 8 y 22 m para el periodo cálido y frío. Se observa una variación anual que en promedio mantiene una diferencia de temperatura entre los 22 y 2 m del orden de  $\sim 3,5^{\circ}\text{C}$  en el periodo frío y de  $\sim 2^{\circ}\text{C}$  para el periodo cálido. Esta diferencia se observa desde las 01 HL hasta el final de la noche.

Para caracterizar la estabilidad superficial sobre La Platina se calculó la diferencia de las temperaturas medias entre los niveles de 8 y 2 m ( $\Delta T_{8-2}$ ). La figura 4.14 muestra la variación diaria y anual de  $\Delta T_{8-2}$  durante el periodo de estudio. Se observa valores de positivos  $\Delta T_{8-2}$ , lo que se puede asociar a una capa térmicamente estable. Estos valores se presentan a partir del atardecer y hasta el amanecer, con un marcado ciclo anual del periodo de transición tarde-noche y noche-día. Se observan dos máximos de estabilidad del orden  $\sim 2^{\circ}\text{C}$ , uno en el mes de abril entre las 24 y 03 HL y otro en el mes de julio entre las 24 y 06 HL. En las tardes en cambio, los valores de  $\Delta T_{8-2}$  son negativos, asociados a una condición inestable generada por el calentamiento superficial, y alcanzan valores máximos del orden de  $\sim -0,8^{\circ}\text{C}$  durante el periodo cálido, mientras que entre el mes de abril y agosto el mínimo es del orden de  $\sim -0,2^{\circ}\text{C}$ .

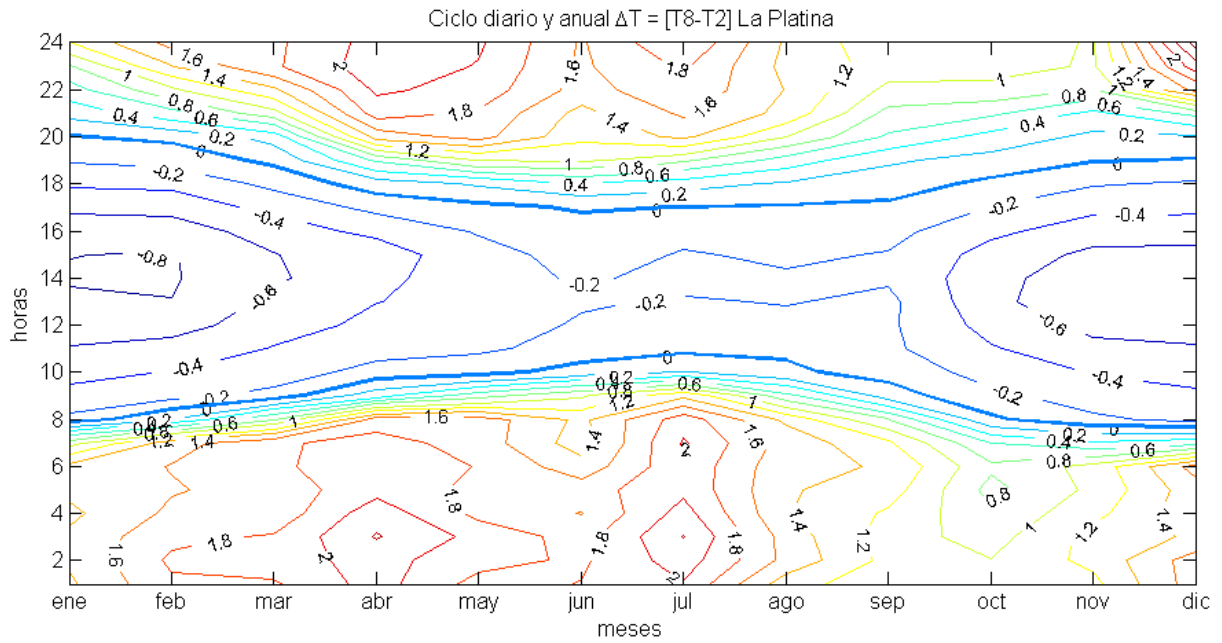
En la figuras 4.15a y 4.15b se presenta la variación mensual de la distribución de frecuencia para  $\Delta T_{8-2}$  entre las 5 y 7 HL y entre 15 y 17 HL, respectivamente. Se observa en la figura 4.15a, que los valores del final de la noche son en general positivos durante todo el periodo, lo que es consistente con la estabilidad esperada cerca del amanecer. El ciclo anual se observa poco definido respecto a los valores típicos (mediana y cuartiles), aunque presenta mayor variabilidad mensual durante el periodo frío. Los valores más altos se presentan especialmente entre los meses de mayo a septiembre con diferencias de temperatura de  $\sim 5^{\circ}\text{C}$  en el espesor. En la figura 4.15b en cambio, el promedio de la tarde presenta una clara variación durante el año, siendo más intenso durante los meses cálidos, observándose para todo el periodo varios días atípicamente estables. Los valores observados durante la tarde son un orden de magnitud menor que la estabilidad al final de la noche y muestran en general una baja variabilidad mensual con valores negativos que son consistentes con la evolución del ciclo diario, donde el calentamiento superficial genera inestabilidad y el desarrollo de la capa de mezcla convectiva (Wallace y Hobbs, 2006). El valor de  $\Delta T$  ( $\sim -0,06^{\circ}\text{C}$ ) asociado a una condición de estabilidad neutra o indiferente para el espesor  $\Delta z = 6\text{m}$ , se muestra en las figuras (línea punteada). Se



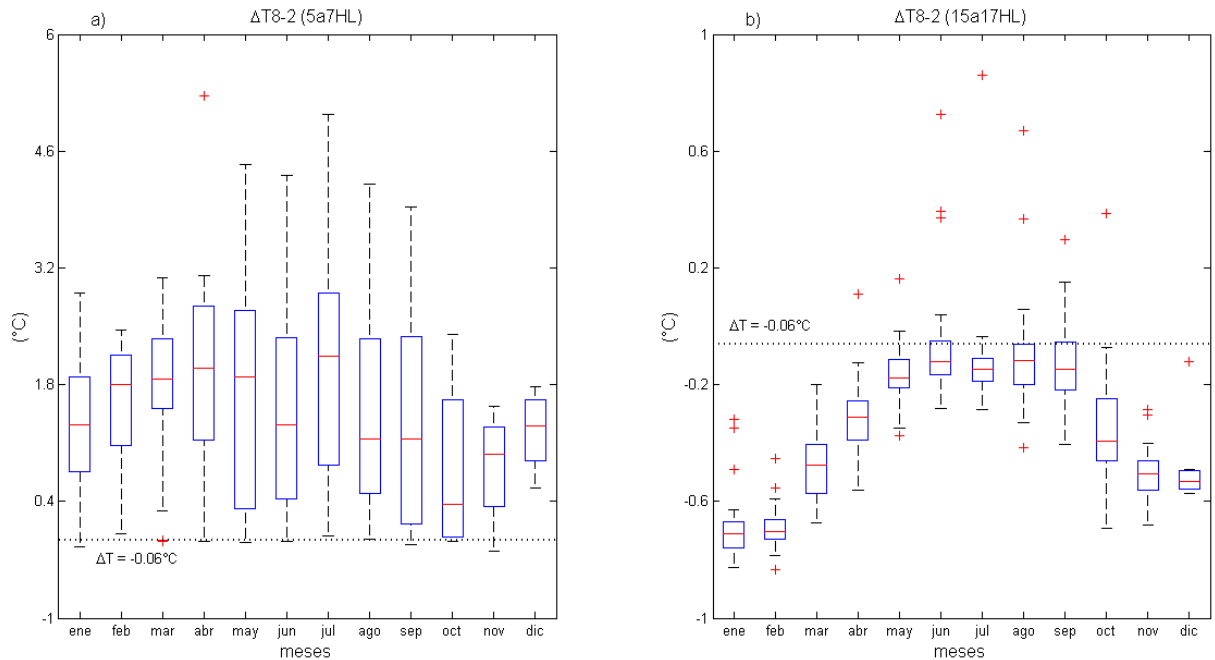
observa para el  $\Delta T$  del final de la noche (5-7 HL), que los valores inferiores de la distribución son cercanos a una condición neutra casi todo el periodo, a diferencia de los valores de  $\Delta T$  para la tarde, donde condiciones de neutralidad se observan en el periodo frío, en el cual se observan además, tardes atípicamente estables.



**Figura 4.13.** Ciclos diarios promedio de temperatura de la estación Torre La Platina para los niveles de 2, 8 y 22 m sobre el nivel de superficie para el periodo cálido y frío.



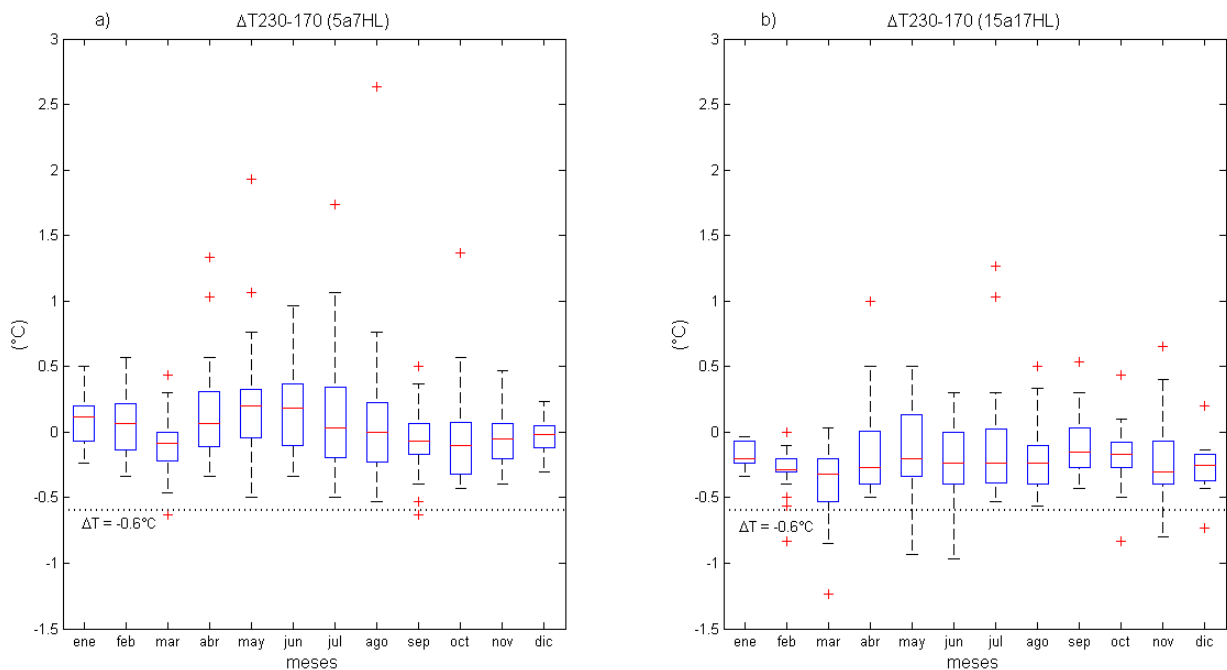
**Figura 4.14.** Ciclo diario y anual de la estabilidad media superficial de datos en Torre La Platina, representada por la diferencia de temperatura entre el nivel de 8 y 2 m sobre superficie.



**Figura 4.15.** Distribución de frecuencia mensual de la estabilidad superficial diaria ( $\Delta T_{8-2}$ ) en la Torre La Platina. a) Estabilidad promedio entre las 5 y 7 HL. b) Estabilidad promedio entre las 15 y 17 HL.

## 4.2.2. Estabilidad atmosférica con datos del perfilador LapRass

A partir de los datos del perfilador se puede realizar una inspección de la estabilidad de la atmósfera a niveles más alejados de la superficie, en este caso se evalúa la diferencia de temperatura entre el nivel de 170 y 230 m ( $\Delta T_{230-170}$ ), que representa la zona inferior del espesor monitoreado por el LapRass. En las figuras 4.16a y 4.16b se muestra la variabilidad mensual de la distribución de frecuencia del promedio para el final de la noche y la tarde respectivamente. Se observa en 4.16a que al final de la noche la estacionalidad de los valores típicos es débil y a diferencia de la estabilidad cercana a superficie presenta menor variabilidad mensual con valores de  $\Delta T_{230-170}$  que fluctúan en torno a cero, lo que se asocia condiciones isotérmicas del espesor. Los valores más altos de  $\Delta T$  se observan en el periodo frío con magnitudes de  $\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ . Los valores de la tarde (Figura 4.15b) son mayoritariamente negativos y también muestran una baja variación anual de sus valores típicos. En ambos casos se observan días atípicamente estables, que para el final de la noche se concentran en el periodo frío mientras que en la tarde se concentra en el período cálido. El valor de  $\Delta T$  ( $-0.6^{\circ}\text{C}$ ) asociado a una condición neutra del espesor ( $\Delta z = 60\text{m}$ ), muestra que en la tarde el espesor es estable y con tendencia a una condición isotermal. Se observan valores inestables para el mes de marzo, mayo, junio y noviembre.



**Figura 4.16.** Distribución de frecuencia mensual de la estabilidad superficial diaria ( $\Delta T_{230-170}$ ) en el perfilador sobre La Platina. a) Estabilidad promedio entre las 5 y 7 HL. b) Estabilidad promedio entre las 15 y 17 HL.

### 4.2.3. Relación entre valores de estabilidad a distintos niveles sobre Santiago

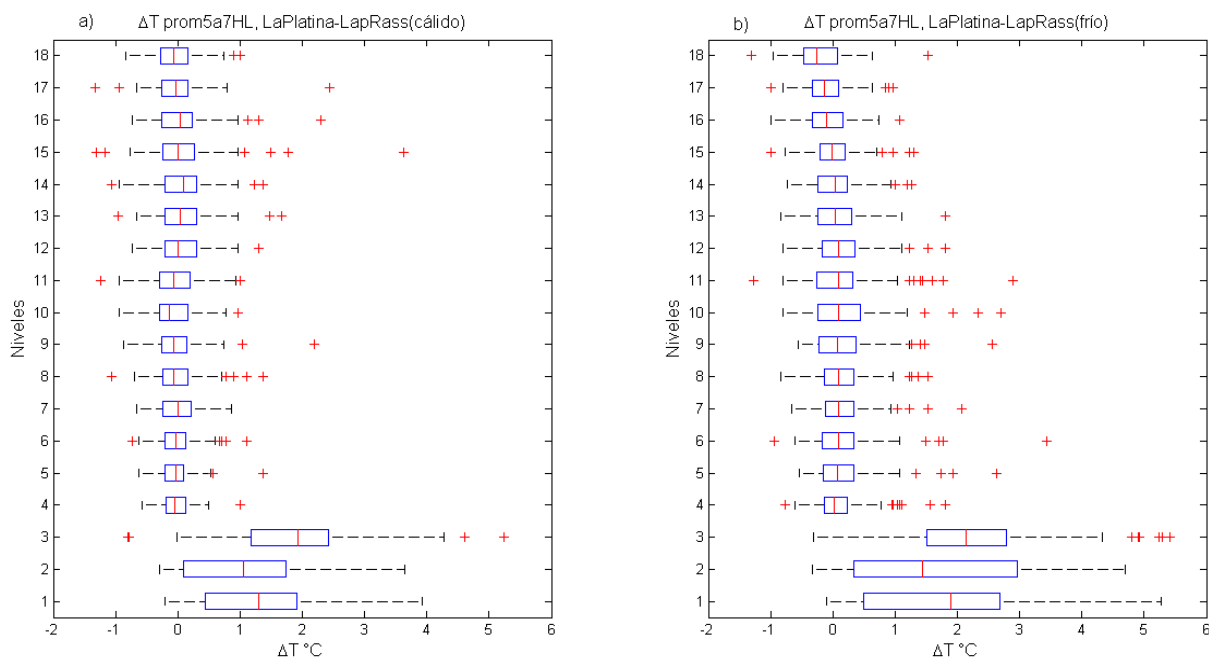
A partir de los datos de la Torre La Platina y del perfilador LapRass se calculó la diferencia de temperatura de cada nivel respecto de su nivel inmediatamente inferior y se analizó su variabilidad en cada nivel tanto para periodo cálido como el frío. En la figura 4.17 se observa que las diferencias de temperatura en el espesor monitoreado por el LapRass muestran una baja variabilidad de  $\Delta T(z)$ , con valores medianos de magnitud comparables entre sí, y valores atípicos que denotan días de alta estabilidad en la columna atmosférica. Se observa un aparente desacoplamiento entre los valores  $\Delta T(z)$  de superficie y los datos observados por el perfilador.

En las figuras 4.18, y 4.19 se presenta el ciclo diario medio para las diferencias de temperatura en superficie ( $\Delta T_{8-2}$ ), para el espesor observado entre la Torre La Platina y el perfilador ( $\Delta T_{170-22}$ ) y dos niveles observados solo por el perfilador ( $\Delta T_{530-170}$ ) y ( $\Delta T_{950-530}$ ), todos tanto para el periodo cálido como para el frío.

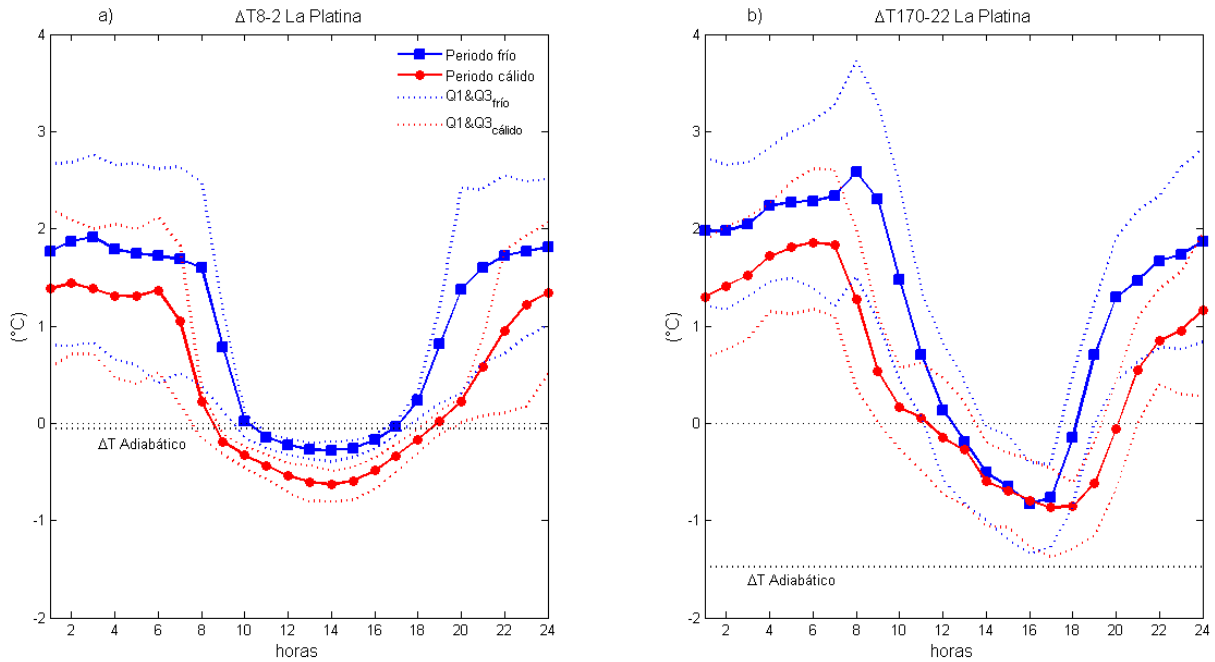
Se observa en 4.18a que en ambos periodos la estabilidad superficial presenta la mayor intensidad durante la noche, siendo mayor en el periodo frío, con valores medios entre 1.5 y 2°C, respectivamente, con un ciclo diario bien marcado. Contemplando que la temperatura asociada a la condición de estabilidad neutra o indiferente para  $\Delta z = 6$  m es de 0.06°C, se observa que la inestabilidad asociada al efecto diurno se expresa a partir de valores negativos que alcanzan valores del orden de  $\sim -0.3$  °C en el periodo frío y de  $\sim -0.5$  °C en el periodo cálido. La fase de transición se inicia en promedio a las 06 HL en el periodo cálido, 2 horas antes que en el periodo frío y termina a las 19 HL, 2 horas después, alcanzando en ambos casos el máximo valor a las 14 HL. La mayor extensión de horas de radiación durante el periodo estival se traduce en mayor número horas con un gradiente negativo, lo que incide en el balance de energía superficial, explicando también la diferencia de intensidad de la estabilidad entre ambos periodos. En el espesor comprendido entre los 22 y 170 m (figura 4.18b), se observa que la estabilidad promedio en ambos periodos es estable todo el tiempo y aumenta progresivamente durante las primeras horas de la noche para alcanzar su máximo valor al amanecer, siendo nuevamente más intensa la estabilidad observada durante el periodo frío. El periodo de transición entre la mañana y la tarde se asocia a un espesor isotérmico, que a diferencia de lo observado en el espesor más superficial, ocurre en promedio unas 2 horas más tarde, a las 10 HL en el periodo cálido y a las 12 HL en el frío, acercándose a una condición neutra las 16 HL en el periodo frío y a las 18 HL en el periodo cálido. El retardo observado

respecto al nivel inferior puede atribuirse a la capa de mezcla que empieza a desarrollarse después del amanecer favoreciendo el calentamiento del aire de las capas superiores, pero a un ritmo algo menor que en superficie, explicando la extensión de las horas de transición.

La estabilidad observada por el perfilador para los espesores 530-170 m y 950-530 m se presenta en las figuras 4.19a y 4.19b respectivamente. La estabilidad representada por  $\Delta T_{530-170}$  muestra un ciclo diario más suave respecto de los niveles inferiores, manteniéndose el espesor estable durante todo el ciclo diario. Durante la noche y las primeras horas de la mañana del periodo frío, se observa una inversión térmica que alcanza una intensidad máxima promedio de  $\sim 1^\circ\text{C}$  cerca de las 09 HL, variando a una condición isotermal cerca del medio día. En el periodo estival, el espesor se observa más bien cuasi-isotérmico durante la noche hasta las 08 HL, cuando los valores de  $\Delta T$  se vuelven negativos alcanzando un mínimo del orden de  $\sim -2.5^\circ\text{C}$ , siendo este valor, el más cercano a los  $-3.6^\circ\text{C}$  que corresponden al  $\Delta T$  asociado a una condición neutra para dicho espesor ( $\Delta z = 360$  m). Se observa que el espesor tiende a ser isotérmico nuevamente a partir de las 20 HL para ambos periodos.

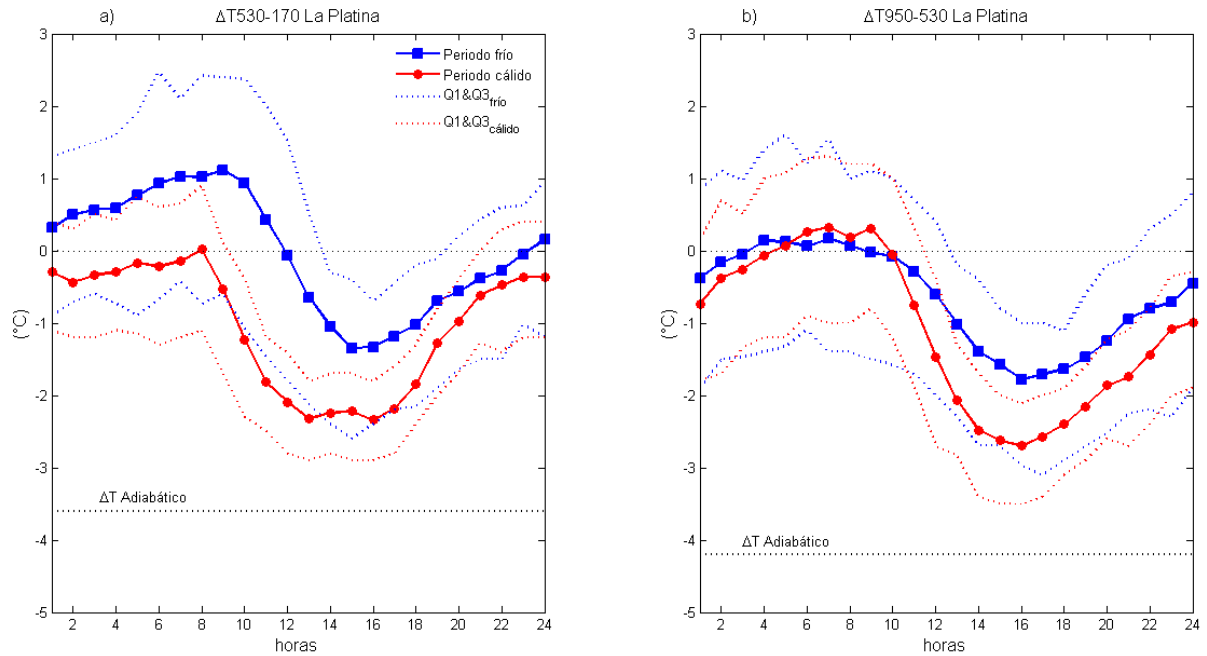


**Figura 4.17.** Variabilidad interdiaria del promedio de 5 a 7 HL de las diferencias de temperatura en La Platina  $\Delta T(z)$  para los valores observados desde la Torre La Platina y desde el perfilador LapRass. a) Período cálido. b) Período frío.



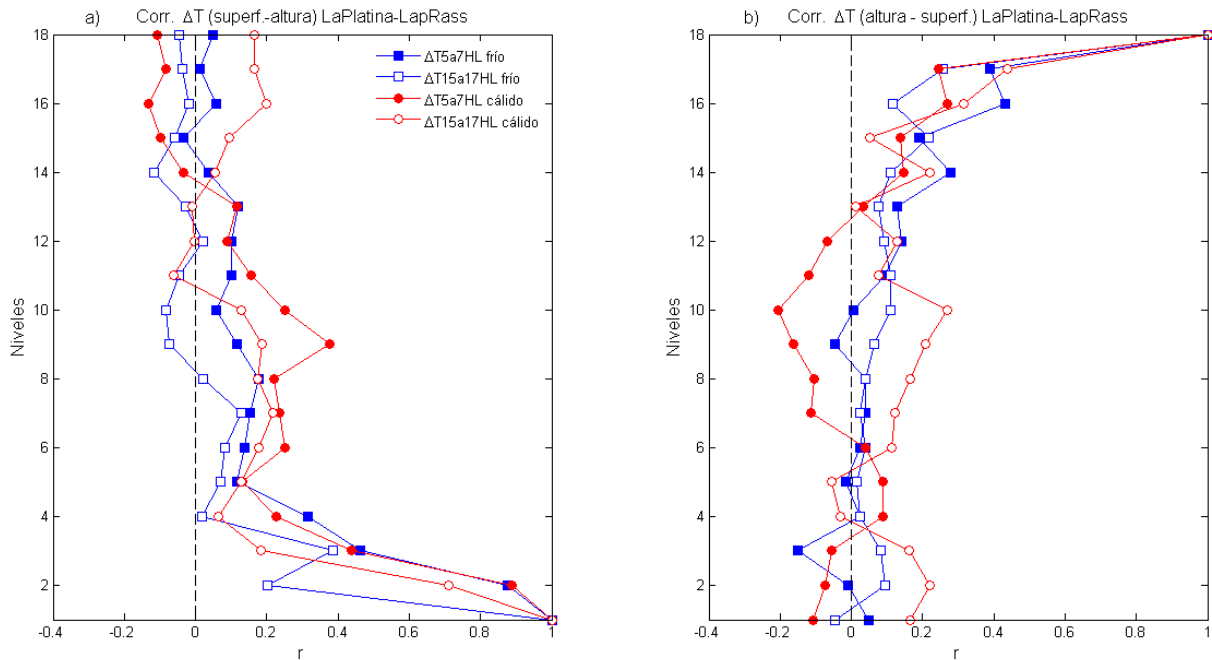
**Figura 4.18.** Ciclo diario medio de la estabilidad en la columna atmosférica sobre La Platina para el periodo frío (líneas azules) y cálido (línea roja). a) Estabilidad superficial en la Torre La Platina ( $\Delta T_{8-2}$ ). b) Estabilidad entre el perfilador y la Torre La Platina ( $\Delta T_{170-22}$ ). La variabilidad se expresa en cada caso a través del rango intercuartílico (Q1 y Q3).

En la figura 4.19b, se muestra la estabilidad para espesor superior observada por el perfilador. Se observa que  $\Delta T_{950-530}$  en ambos periodos (frío y cálido), presenta una condición de estabilidad durante todo el día. En el periodo nocturno se observa una capa de inversión débil, que se inicia a partir de las 03 HL y 04 HL para el periodo frío y cálido respectivamente, con una tendencia isotermal ( $\Delta T \sim 0$ ). El resto de tiempo, los valores se presentan negativos y alcanzan un mínimo de  $\sim -2.5^\circ\text{C}$  en el periodo cálido y de  $\sim -1.5^\circ\text{C}$  en el frío. Para este espesor ( $z = 420$  m), el valor de  $\Delta T$  para una condición neutra es de  $-4.2^\circ\text{C}$ . El comportamiento del ciclo diario de la estabilidad observada por el perfilador se puede asociar, durante la noche a la distancia del espesor de la superficie y durante el periodo diurno al efecto de mezcla que acerca el gradiente vertical de temperatura a una condición de estabilidad indiferente.



**Figura 4.19.** Ciclo diario medio de la estabilidad en la columna atmosférica sobre La Platina para el periodo frío (líneas azules) y cálido (línea roja). a) Estabilidad observada por el perfilador ( $\Delta T_{530-170}$ ). b) Estabilidad observada por el perfilador ( $\Delta T_{950-530}$ ). La variabilidad se expresa en cada caso a través del rango intercuartílico (Q1 y Q3).

Un análisis de la relación a nivel inter-diario entre la diferencia de temperatura superficial ( $\Delta T_{8-2}$ ) con respecto a los niveles superiores y viceversa, se muestra en la figura 4.20. Se observa que la correlación de la estabilidad superficial con el nivel inmediatamente superior ( $\Delta T_{22-8}$ ) es alta ( $r \sim 0,9$ ), pero luego decae rápidamente a partir de la estabilidad asociada a ( $\Delta T_{170-110}$ ) que es calculada a partir de datos del perfilador. Lo anterior refuerza nuevamente la idea del desacoplamiento de las temperaturas superficiales y de un comportamiento distintivo entre la estabilidad superficial y la estabilidad observada en las capas superiores.



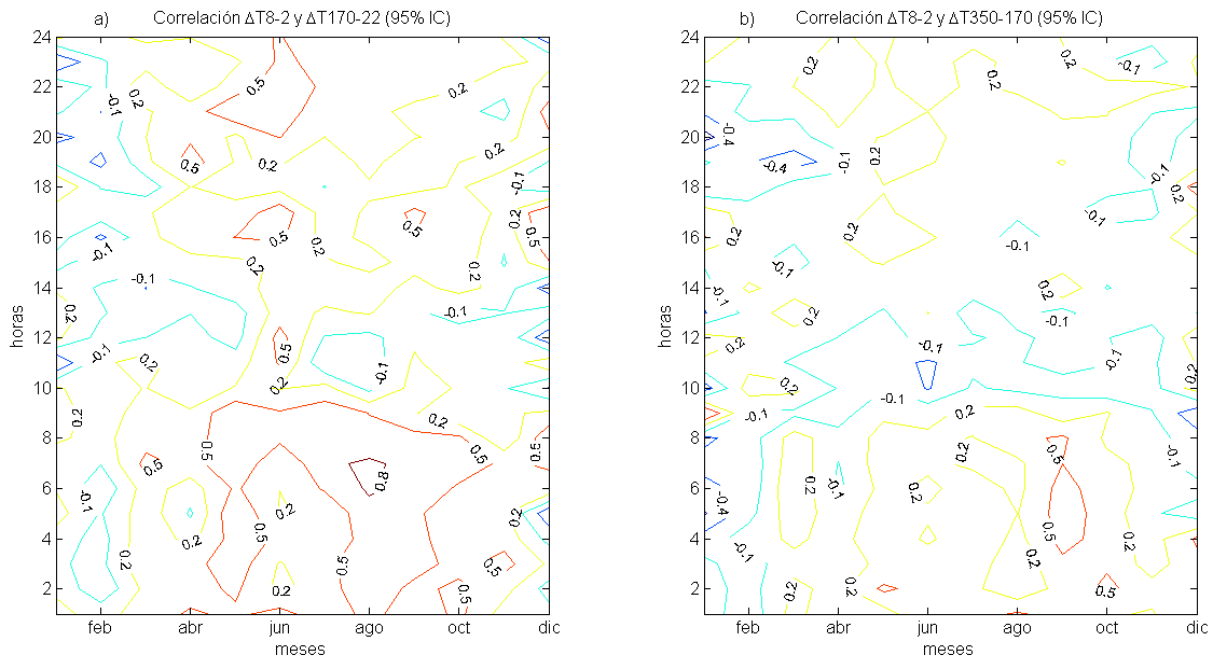
**Figura 4.20.** Variación de la correlación de la estabilidad media en función de la altura  $\Delta T(z)$  a partir de observaciones desde la Torre La Platina y desde el Perfilador, para el promedio de 5 a 7 HL y de las 15 a 17 HL. a) Correlación entre  $\Delta T_{8-2}$  y niveles superiores. b) Correlación entre  $\Delta T_{1010-950}$  y niveles inferiores.

Una inspección del ciclo diario y anual de la correlación entre la estabilidad superficial ( $\Delta T_{22-8}$ ) y valores de niveles más altos ( $\Delta T_{170-22}$ ) y ( $\Delta T_{350-170}$ ) se presenta en las figuras 4.21a y 4.21b, respectivamente. Se observa en el primer caso (Figura 4.21a), que para el periodo en estudio las mayores correlaciones se observan durante la noche y cerca del amanecer con un máximo en el mes de agosto ( $r \sim 0.8$ ), aunque los valores más característicos son del orden de  $\sim 0.5$  observándose entre las 20 y 22 HL en los meses de abril a junio, y en algunos casos cerca de las 16 HL. El resto del tiempo los valores de correlación son bajos ( $r \sim 0.2$ ), después de la transición día-tarde y tarde-noche, especialmente en el periodo frío. La correlación entre la estabilidad superficial  $\Delta T_{22-8}$  y  $\Delta T_{350-170}$  (ver figura 4.21b), muestra para el periodo frío un ciclo diario y anual con valores de correlación bajos durante la noche ( $r \sim 0.2$ ), y con un máximo de ( $r = 0.5$ ) en el amanecer del mes de septiembre. Esto implica una baja relación entre la diferencia de temperatura de superficie y el espesor de mayor altura en la columna atmosférica.

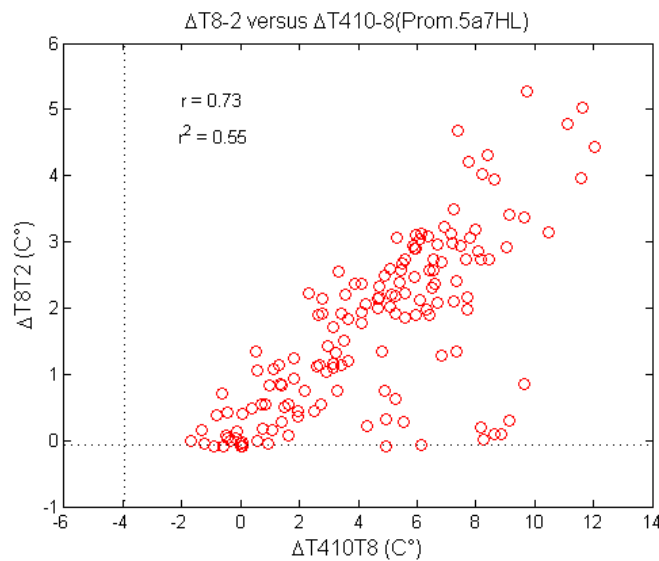
Considerando los valores de diferencia de temperatura  $\Delta T_{410-8}$  como representativa de la estabilidad en el seno de la cuenca, en la figura 4.22 se muestra un gráfico de dispersión entre dicha estabilidad y la estabilidad superficial representada por  $\Delta T_{8-2}$  para el final de la noche. Se puede observar una relación lineal entre ambas estabilidades, lo que indica que el aumento de



la estabilidad en la cuenca está asociado también al aumento de la estabilidad en superficie. Lo anterior es coherente con observaciones de gran calentamiento observada en la estación de Lo Prado (~1070 msnm) y que se han considerado representativas de la condición de borde de la capa estable de la cuenca debido a fenómenos de subsidencia (Muñoz, 2003. Desarrollos de Metodologías de Pronóstico de Episodios).



**Figura 4.21.** Variación diaria y estacional de la correlación de la estabilidad superficial y la estabilidad en niveles superiores. a) Correlación entre  $\Delta T_{8-2}$  y  $\Delta T_{170-22}$ . b) Correlación entre  $\Delta T_{8-2}$  y  $\Delta T_{350-170}$ .



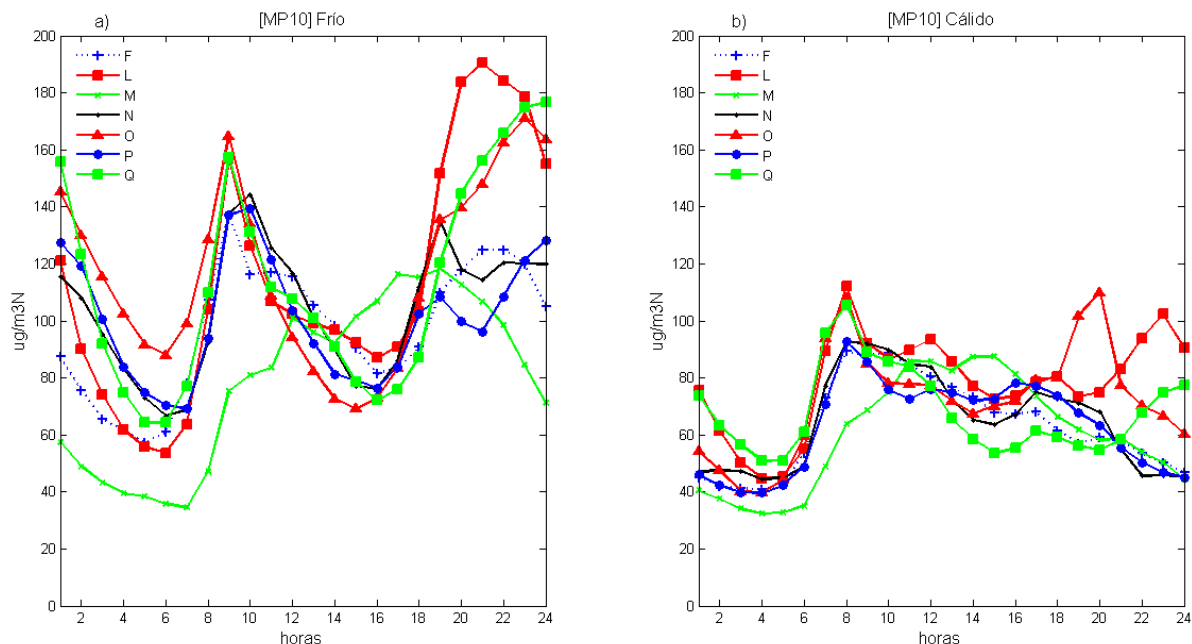
**Figura 4.22.** Dispersión entre la estabilidad de la cuenca  $\Delta T_{410-8}$  y la estabilidad superficial  $\Delta T_{8-2}$  al final de la noche representado por el promedio entre las 5 y 7 HL. Líneas punteadas indican el valor de estabilidad neutra en cada caso.

### **4.3. Concentraciones de MP10 en Santiago y episodios de contaminación 1999**

En esta sección se presenta una caracterización de las concentraciones de Material Particulado (MP10), en particular durante los episodios críticos de contaminación observados para el periodo 1999. Se presenta primero la variabilidad del ciclo diario de las concentraciones de MP10 para las distintas estaciones de monitoreo de calidad del aire de la región de estudio y se analiza el comportamiento de las mismas tanto para el periodo cálido como frío. Se describe además, la relación entre las concentraciones horarias y los índices de calidad del aire utilizados para su seguimiento, y se explica el criterio de selección de los casos de estudio donde se analizará la relación de las concentraciones de MP10 y los perfiles de temperatura, índices de estabilidad a distintos niveles y configuraciones meteorológicas observadas en cada caso.

#### **4.3.1. Variabilidad de las concentraciones de Material Particulado (MP10)**

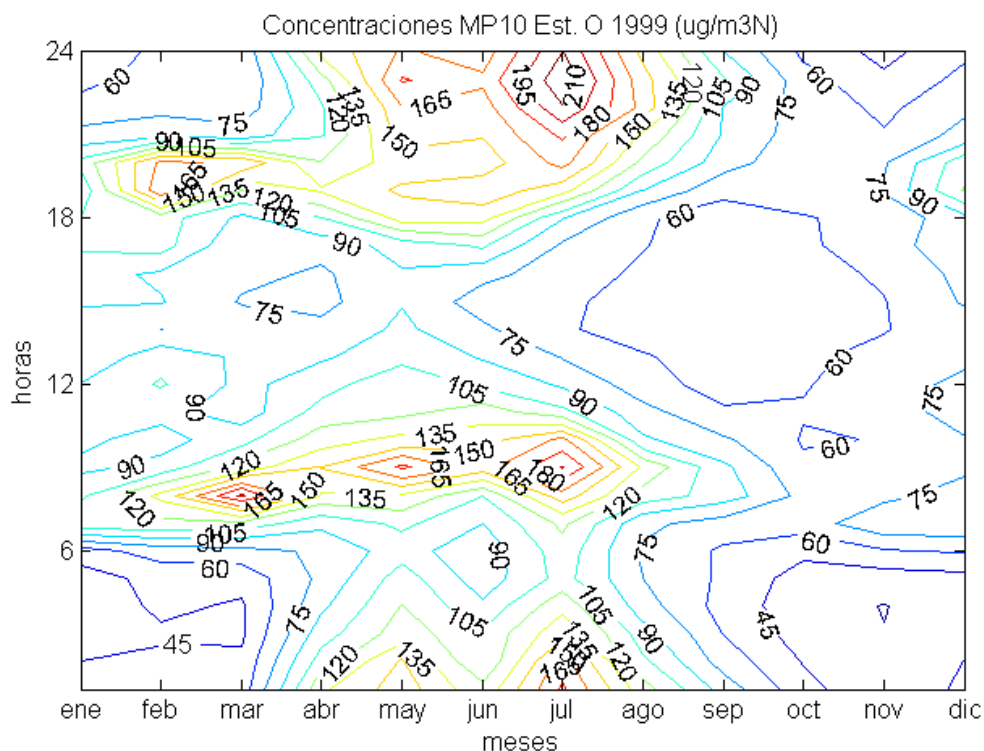
Las figuras 4.23a y 4.23b muestran el ciclo diario promedio de MP10 en las estaciones de monitoreo de la región para el periodo frío y cálido, respectivamente. Las concentraciones medias son claramente más altas en el periodo frío que en el cálido, especialmente después de las 18 HL y durante la noche. En ambos periodos se observa un peak matinal muy bien definido que es antecedido siempre por un mínimo de las concentraciones de MP10 al final de la noche. Este peak matinal es más intenso en el periodo frío que en el cálido, con valores máximos en algunas estaciones del orden de ~160 ug/m<sup>3</sup>N, mientras que en el periodo cálido no superan los 120 ug/m<sup>3</sup>N. Durante la tarde, para ambos periodos, se observa un nuevo mínimo de concentraciones en torno a las 15 y 16 HL, que en el periodo frío es más marcado en comparación al periodo cálido en el que las concentraciones decaen más suavemente. En definitiva, los máximos y mínimos de concentración del ciclo diario parecen estar asociados a la transición de la mañana y de la tarde de la capa de mezcla atmosférica, lo que es consistente con lo observado en Muñoz (2011), donde se observó que los peaks de concentración de MP10 de la mañana y noche en Santiago, se producen durante las horas del día en que las altas emisiones se combinan con una baja capacidad de dispersión de contaminantes en la capa límite atmosférica. Respecto de las diferencias de los niveles de concentración observada entre el periodo cálido y frío, estas pueden ser explicadas en gran medida por la variabilidad anual del crecimiento de la capa de mezcla, en asociación a una mayor insolación del periodo estival. La radiación en Santiago durante el periodo invernal ha sido estimada para días despejados en unos ~ 400 Wm<sup>-2</sup> (Muñoz 1993, citado en Garreaud y Rutllant 2006).



**Figura N°4.23.** Ciclo diario promedio de las concentraciones de MP10 en ug/m<sup>3</sup>N para las 7 estaciones de monitoreo de calidad del aire de la RM. a) Periodo frío. b) Periodo cálido.

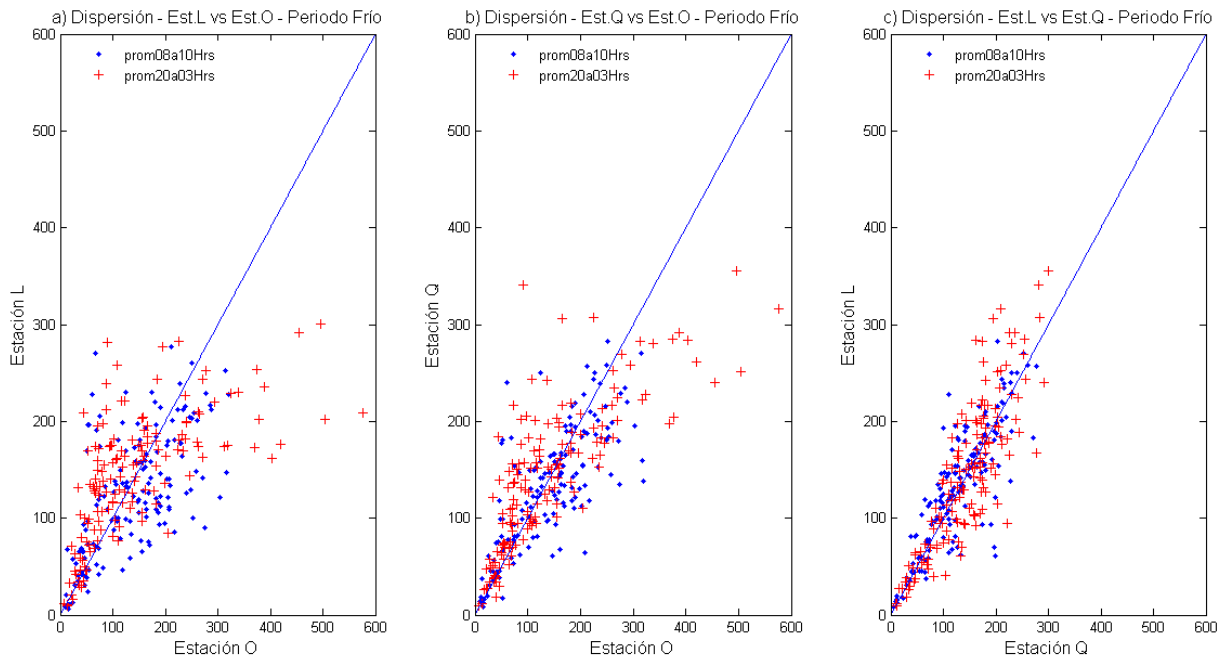
Respecto al comportamiento individual de las estaciones en el periodo frío, las estaciones **L**, **O** y **Q** son las que presentan las concentraciones más altas, tanto en el peak matinal como el observado después de las 18 HL. La estación **M** presenta un comportamiento distinto al resto, siempre con la menor concentración de MP10, lo que se puede atribuir a su ubicación geográfica dentro de la cuenca (ver figura 3.1). Por este motivo se descartará su utilización en los análisis desarrollados en este trabajo.

En la figura 4.24, se presenta el ciclo medio diario y anual de la estación de monitoreo **O** que presenta las mayores concentraciones durante el año 1999. Los máximos nocturnos y matinales se inician a partir del mes de marzo y se mantienen hasta agosto. Una caracterización de las concentraciones de MP10 en la zona poniente fue desarrollada por Muñoz (2003) utilizando observaciones de MP10 entre los años 2000 y 2002. Los resultados sugirieron que las concentraciones nocturnas de la estación **O** son las más relevantes en los problemas de contaminación atmosférica de la región.



**Figura N°4.24** Ciclo diario y anual promedio de las concentraciones de MP10 en ug/m3N para estación para la Estación O Pudahuel, año 1999.

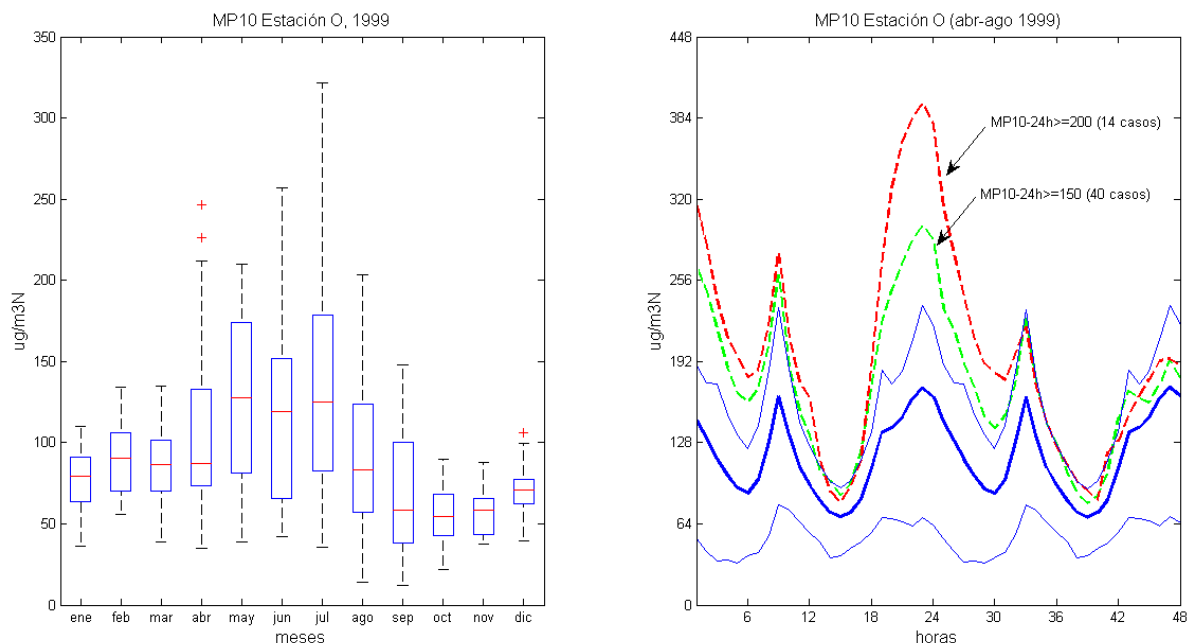
Con el objeto de inspeccionar la variabilidad interdiaria del MP10 entre las estaciones de monitoreo con las concentraciones más altas (O, L y Q), se presenta en la figura 4.25 la dispersión de los promedios diarios representativos de la mañana (promedio entre las 07 y 10 HL) y del periodo nocturno (promedio entre las 20 y 03 HL). Se observa en la figura 4.25a y 4.25b, que en las mañanas la estación O alcanza valores del orden de los ~ 320 ug/m3N, mientras que en las estaciones L y Q alcanzan valores algo inferiores a ~ 285 ug/m3N. En el periodo nocturno, en cambio, las concentraciones medias de la estación O aumentan de manera importante alcanzando valores de ~ 600 ug/m3N, mientras que en L y Q no se superan los ~ 360 ug/m3N. Las concentraciones medias de L y Q (figura 4.25c), se observan correlacionadas linealmente para ambos promedios, especialmente para concentraciones inferiores a ~100 ug/m3N. Lo anterior se puede interpretar como la respuesta de ambas estaciones de monitoreo a un efecto común. La estación O muestra mayores concentraciones que L y Q, con mayor dispersión en el periodo nocturno, en especial para las concentraciones más altas, lo que podría implicar en este caso una respuesta específica de las concentraciones de la estación O cuando las concentraciones de MP10 son superiores a 300ug/m3N.



**Figura N°4.25.** Dispersión entre promedios de MP10 representativos para el final de la noche (azul) y del periodo nocturno (rojo) para las estaciones Pudahuel (O), La Florida (L) y El Bosque (Q). a) Dispersión entre Pudahuel y La Florida. b) Dispersión entre Pudahuel y El Bosque. c) Dispersión entre La Florida y El Bosque.

Una descripción de la variación de frecuencia mensual de los promedios diarios de la estación **O** se presenta en la figura 4.26a. Se observa que la mayor variabilidad de los valores medios se presenta en el periodo frío. Los valores medianos se observan más altos en los meses de mayo a julio, siendo este último, el mes con mayor variabilidad. Se observa además, que los valores extremos se presentan especialmente altos entre los meses de abril a agosto, con dos eventos atípicos en el mes de abril. En la figura 4.26b se muestra el ciclo diario medio de MP10 para la estación **O** durante el periodo frío y su variabilidad representada por el rango intercuratílitico para una ventana temporal de 48 hrs. Se observa que los máximos de concentraciones promedio en la mañana y en la noche presentan gran variabilidad. Con el objeto de identificar diferencias entre los días con mayores concentraciones horarias, se seleccionaron los días cuyos promedio diarios fueron mayores o iguales a 150 ug/m<sup>3</sup>N (40 casos) y días cuyo promedio diario fue igual o superior a 200 ug/m<sup>3</sup>N (14 casos). Se observa que el peak matinal aumenta respecto del promedio, cerca de un ~ 60% en el primer caso y cerca de ~70% en el segundo. Para el peak nocturno, se observa un aumento cercano al ~ 76% en el primer caso y de ~135% en el segundo, respecto a los días típicos. Por lo tanto, los

días de mayor concentración de MP10 presentan ciclos diarios donde el peak nocturno es especialmente alto y atípico respecto de los días promedio.



**Figura N°4.26.** Variación de concentraciones medias diarias de MP10 en la estación O (Pudahuel) para el año 1999. a) Variación de frecuencia mensual de MP10. b) Ciclo diario medio estación O y su variabilidad intercuartílica (líneas color azul). En líneas punteadas se muestran los ciclos para días con  $\text{MP10-24h} \geq 150 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  (verde) y  $\text{MP10-24h} \geq 200 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  (rojo).

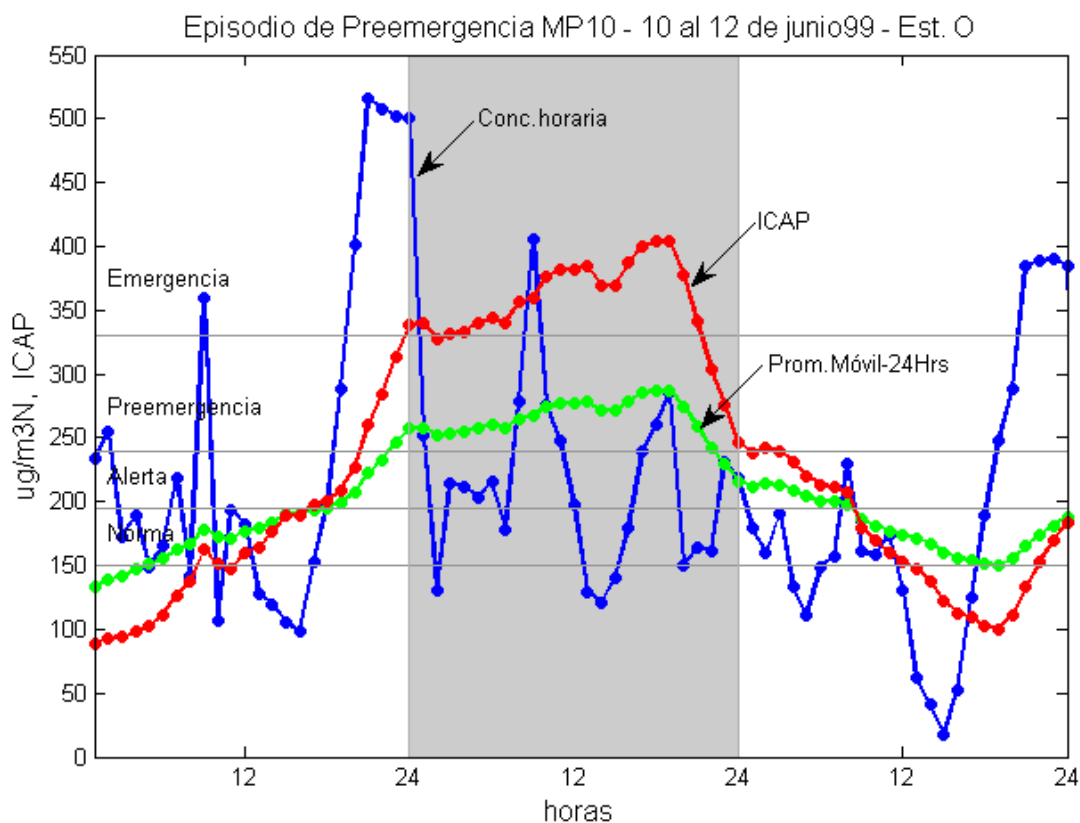
#### 4.3.2. Episodios Críticos de contaminación por Material Particulado (MP10)

Para el periodo en estudio, los datos oficiales consignaron un total 36 días de episodio crítico de contaminación por MP10, donde en 23 días se constató la condición de Alerta, en 12 días Preemergencia y un día de Emergencia Ambiental, lo anterior sobre la base de la evolución del promedio móvil de las últimas 24 hrs. Tal como se indicó en la sub-sección 2.2.2, los episodios, se estimaron a partir del promedio móvil de 24 hrs. al cual se ha aplicado el Índice de Calidad del Aire referido a Partículas (ICAP).

Sin embargo, este criterio de cuantificación de los episodios críticos responde más bien a un criterio de tipo administrativo, que se circunscribe en la necesidad de establecer el número de horas en que dicho promedio móvil de 24 hrs de MP10 sobrepasa los límites umbrales de concentración, que se han definido como niveles de exposición en términos de salud ambiental.

Lo anterior genera que el seguimiento del ciclo diario de las concentraciones horarias de MP10, sea especialmente importante, ya que el aumento o disminución de estas, se traduce en una respuesta del promedio móvil de 24hrs. Lo anterior, impone un complejo escenario si se observan episodios de contaminación atmosférica como es el caso de la cuenca de Santiago, en especial cuando se pretende prevenir dichos episodios a través, por ejemplo, con la restricción de emisiones de Material Particulado o de sus precursores, a partir de la elaboración de pronósticos de calidad del aire.

Con el objeto de mostrar la evolución de las concentraciones horarias, respecto del promedio móvil de 24 hrs y del índice ICAP asociado, se presenta en la figura 4.27 el seguimiento de un episodio crítico de contaminación observado en la estación **O** entre los días 10 y 12 de junio de 1999. En la figura se observa que las concentraciones horarias de MP10 en las primeras horas son del orden de  $\sim 200 \text{ ug/m}^3\text{N}$ , disminuyen al amanecer para luego presentar un peak matinal del orden de  $\sim 370 \text{ ug/m}^3\text{N}$ . El promedio móvil en tanto se ha incrementado progresivamente alcanzando el umbral de  $195 \text{ ug/m}^3\text{N}$  (o ICAP 200) cerca de las 18 HL, constatándose la condición de Alerta Ambiental. Las concentraciones horarias siguen incrementándose mostrando un peak nocturno de concentraciones horarias sobre los  $500 \text{ ug/m}^3\text{N}$ , tal que cerca de las 22 HL el promedio móvil cruza el umbral de  $240 \text{ ug/m}^3\text{N}$  alcanzándose entonces un episodio de Preemergencia Ambiental. Se puede apreciar que después de las 24 HL, las concentraciones horarias disminuyen fuertemente a valores inferiores a  $150 \text{ ug/m}^3\text{N}$ , no obstante, la condición de Preemergencia está en pleno desarrollo. Este desfase habitual entre los valores horarios y el promedio móvil o el índice ICAP, hace que la clasificación de episodios críticos usada oficialmente sea poco recomendable si se trata de representar fenómenos físicos de la atmósfera. Por lo tanto, con el objetivo de caracterizar las condiciones térmicas de la atmósfera sobre Santiago y su relación con las variaciones de concentración del MP10, se usaran en lo sucesivo, otros criterios de agrupamiento.



**Figura N°4.27.** Episodio Crítico de Preemergencia Ambiental observado entre el 10 y 12 de junio de 1999. Se presenta la variación de las concentraciones horarias (color azul), del promedio móvil de 24hrs (color verde) y del Índice de Calidad del Aire referido a Partículas ICAP (color rojo). Se indica el umbral para los niveles de Norma diaria (150 ug/m3N), Alerta (195 ug/m3N), Preemergencia (245 ug/m3N) y Emergencia (330 ug/m3N).

#### 4.3.3. Condición sinóptica asociada a episodios críticos por MP10

Como se indicó en el capítulo 2, en Santiago diversos estudios han caracterizado las condiciones sinópticas que se asocian a la ocurrencia de episodios de alta contaminación (ver por ejemplo, Rutllant y Garreaud 1995; Garreaud y Rutllant, 2004), destacándose la importancia de dos configuraciones meteorológicas en relación a periodos de baja ventilación y alta concentración de contaminantes: La configuración de baja costera en superficie y dorsal en altura (D/Vc), y el predominio de condiciones Prefrontales (PF). En efecto, la Autoridad Ambiental implementó durante 1998 un programa de seguimiento de las condiciones sinópticas durante el periodo frío (abril - agosto) con el objeto de pronosticar, en base a dichas



configuraciones, un índice del Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica en Santiago (PMCA)<sup>26</sup>.

De este modo, y con el propósito de caracterizar los episodios críticos observados en la estación O durante el periodo 1999, se han seleccionado los episodios que contabilizó la Autoridad Ambiental en las distintas estaciones de monitoreo, agrupándolos como eventos de varios días, según el número de horas en que el promedio móvil de 24 hrs para MP10 estuvo en dicha condición. Una vez identificados estos días, a partir de una inspección de los datos horarios de MP10 para cada evento, se agregó uno o dos días, antes y/o después de la fecha de episodio, manteniendo una ventana temporal de 5 días, asegurando de este modo, la inclusión de las concentraciones horarias antes y después de los episodios. Una vez definidos los eventos de alta contaminación, se incluyó el patrón sinóptico observado, el cual se obtuvo desde las estadísticas del programa oficial de pronóstico meteorológico implementado durante el periodo otoño-invierno de 1999<sup>27</sup>.

Los resultados de esta clasificación se presentan en la tabla N°4.1. Como se observa, se contabiliza un total de 17 eventos de contaminación por MP10, de los cuales 16 eventos muestran la participación de la estación O. De estos 16 eventos, 8 se produjeron solo en dicha estación, mientras que en los 8 restantes el evento se manifestó paralelamente en otras estaciones de la red. Cabe indicar que los eventos son de distintas magnitudes y tiempos de duración.

**Tabla N°4.1 Clasificación de Eventos de Episodio Crítico periodo abril-agosto1999**

N° Evento	Fecha oficial de episodio	Estaciones y N° de hrs en episodio	Selección de días	Condición sinóptica observada los días seleccionados*
1	-	-	15 de abril	Dorsal
	16 de abril	<b>O (02)</b>	16 de abril	Dorsal en altura y Vaguada costera
	17 de abril	<b>O (24) y L (05)</b>	17 de abril	Dorsal en altura y Vaguada costera
	18 de abril	<b>O (01) y Q (02)</b>	18 de abril	Advección – niebla
	-	-	19 de abril	Advección débil

<sup>26</sup> El pronóstico de dicho índice se asocia al Plan Operacional para enfrentar Episodios Críticos, desarrollado como una medida permanente en el Plan de Prevención y Descontaminación de Santiago (D.S.N°16/98, D.S.N°58/2004 y D.S.N°66/2010 vigente).

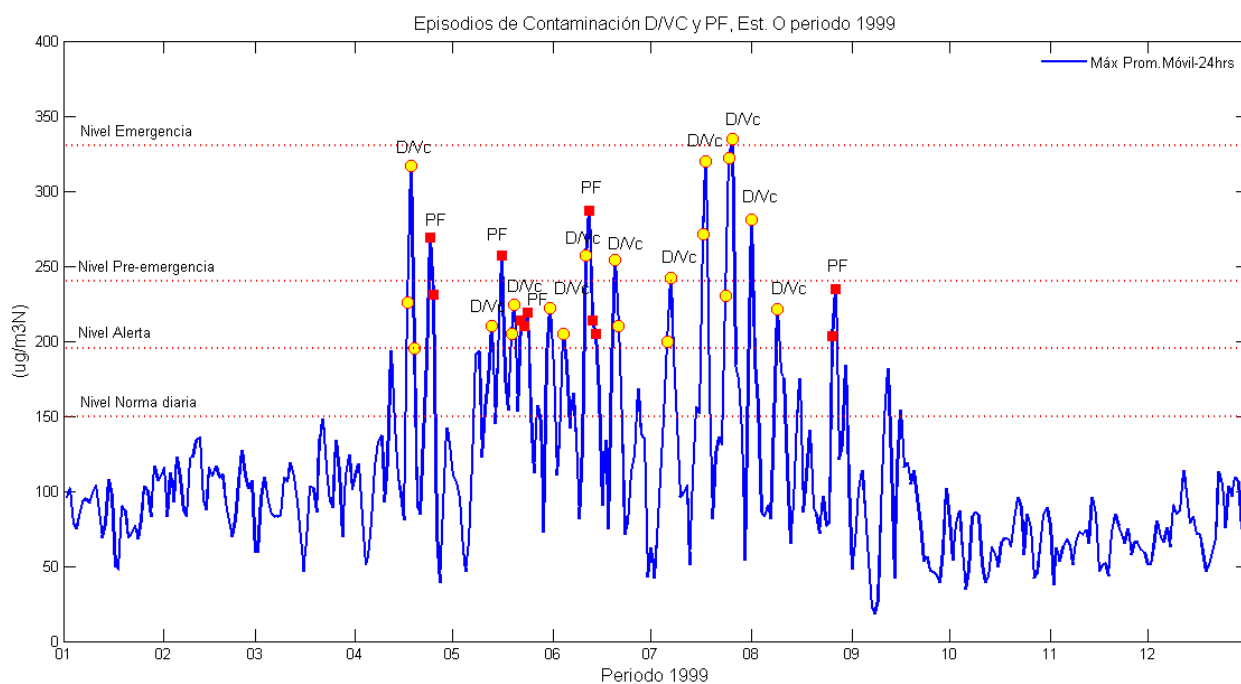
<sup>27</sup> Ver Anexo 3. Condición sinóptica observada para el periodo abril-agosto de 1999, estadística del programa prioritario pronóstico meteorológico para calidad del aire de la Región Metropolitana. Gentileza de Sr. Manuel Merino Th. Centro Nacional del Medio Ambiente, CENMA.

2	-	-	21 de abril	Vaguada en altura
	-	-	22 de abril	Baja pre-frontal
	23 de abril	<b>L (10), N (21), O (24), P (16) y Q (12)</b>	23 de abril	Baja pre-frontal
	24 de abril	<b>L (09), N (06), O (04), P (09) y Q (09)</b>	24 de abril	Advección no saturada
	-	-	25 de abril	Advección no saturada
3	-	-	10 de mayo	Dorsal
	11 de mayo	<b>N (01)</b>	11 de mayo	Dorsal en altura y Vaguada costera
	12 de mayo	<b>L (07), N (18), O (17), P (02) y Q (05)</b>	12 de mayo	Dorsal en altura y Vaguada costera
	-	-	13 de mayo	Advección
	-	-	14 de mayo	Baja pre-frontal
4	-	-	13 de mayo	Advección
	-	-	14 de mayo	Baja pre-frontal
	15 de mayo	<b>O (23) y Q (12)</b>	15 de mayo	Baja pre-frontal
	-	-	16 de mayo	Frente en altura
	-	-	17 de mayo	Dorsal
5	-	-	16 de mayo	Frente en Altura
	-	-	17 de mayo	Dorsal
	18 de mayo	<b>O (16)</b>	18 de mayo	Dorsal en altura y Vaguada costera
	19 de mayo	<b>O (21)</b>	19 de mayo	Dorsal en altura y Vaguada costera
	-	-	20 de mayo	Advección Débil
6	-	-	20 de mayo	Advección Débil
	21 de mayo	<b>O (16)</b>	21 de mayo	Baja pre-frontal
	22 de mayo	<b>O (18)</b>	22 de mayo	Baja pre-frontal
	23 de mayo	<b>O (18)</b>	23 de mayo	Baja pre-frontal
	24 de mayo	-	24 de mayo	Alta Fría
7	-	-	28 de mayo	Advección
	-	-	29 de mayo	Dorsal
	30 de mayo	<b>O (14)</b>	30 de mayo	Dorsal en altura y Vaguada costera
	-	-	31 de mayo	Zonal
	-	-	1 de junio	Advección
8	-	-	1 de junio	Advección
	-	-	2 de junio	Advección
	3 de junio	<b>O (06) y Q (02)</b>	3 de junio	Dorsal en altura y Vaguada costera
	4 de junio	<b>N (04), P (13) y Q (23)</b>	4 de junio	Dorsal en altura y Vaguada costera
	-	-	5 de junio	Advección no saturada
9	-	-	9 de junio	Dorsal
	10 de junio	<b>O (07) y P (01)</b>	10 de junio	Dorsal en altura y Vaguada costera
	11 de junio	<b>N (13), O (24) y P (19)</b>	11 de junio	Baja pre-frontal
	12 de junio	<b>O(08)</b>	12 de junio	Dorsal en altura
	13 de junio	<b>N (03) y O(06)</b>	13 de junio	Vaguada en altura
10	-	-	17 de junio	Frente débil
	-	-	18 de junio	Dorsal
	19 de junio	<b>N (02) y O (24)</b>	19 de junio	Dorsal en altura y Vaguada costera
	20 de junio	<b>L (16), N (17) y O (06)</b>	20 de junio	Dorsal en altura y Vaguada costera

	-	-	21 de junio	Vaguada en altura
11	-	-	4 de julio	Dorsal
	5 de julio	<b>O (05)</b>	5 de julio	Dorsal en altura y Vaguada costera
	6 de julio	<b>F (06), N (01) y O (24)</b>	6 de julio	Dorsal en altura y Vaguada costera
	-	-	7 de julio	Dorsal en altura y Vaguada costera
	-	-	8 de julio	Vaguada en altura
12	-	-	7 de julio	Dorsal en altura y Vaguada costera
	8 de julio	<b>L (02)</b>	8 de julio	Vaguada en altura
	9 de julio	<b>L (12)</b>	9 de julio	Baja pre-frontal
	10 de julio	<b>L (02)</b>	10 de julio	Vaguada en altura
	-	-	11 de julio	Frente Activo
13	-	-	14 de julio	Vaguada en altura
	-	-	15 de julio	Vaguada en altura
	16 de julio	<b>O (06)</b>	16 de julio	Dorsal en altura y Vaguada costera
	17 de julio	<b>O (24)</b>	17 de julio	Dorsal en altura y Vaguada costera
	-	-	18 de julio	Advección
14	-	-	22 de julio	Zonal
	23 de julio	<b>O (03)</b>	23 de julio	Dorsal
	24 de julio	<b>O (24)</b>	24 de julio	Dorsal en altura y Vaguada costera
	25 de julio	<b>O (24)</b>	25 de julio	Dorsal en altura y Vaguada costera
	-	-	26 de julio	Advección no saturada
15	-	-	29 de julio	Frente activo
	-	-	30 de julio	Dorsal en altura y Vaguada costera
	31 de julio	<b>L (07), N (14), O (23), P (17) y Q (17)</b>	31 de julio	Dorsal en altura y Vaguada costera
	-	-	1 de agosto	Advección no saturada
	-	-	2 de agosto	Vaguada en altura
16	-	-	6 de agosto	Frente activo
	-	-	7 de agosto	Dorsal
	8 de agosto	<b>O (08)</b>	8 de agosto	Dorsal en altura y Vaguada costera
	-	-	9 de agosto	Dorsal en altura y Vaguada costera
	-	-	10 de agosto	Dorsal
17	-	-	24 de agosto	Dorsal en altura y Vaguada costera
	25 de agosto	<b>O (01)</b>	25 de agosto	Dorsal en altura y Vaguada costera
	26 de agosto	<b>O (21)</b>	26 de agosto	Baja pre-frontal
	-	-	27 de agosto	Vaguada en altura
	-	-	28 de agosto	Vaguada en altura
<b>Total</b>	<b>36</b>			

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente, estadísticas oficiales del programa de Gestión de Episodios, periodo 1999 \*Condición Sinóptica observada por el Centro Nacional del Medio Ambiente CENMA, bajo el programa de Pronóstico Meteorológico de Calidad del Aire para la Región Metropolitana periodo 1999.

El reporte sinóptico muestra que los eventos de este periodo se asocian mayoritariamente al paso de dorsales en altura y presencia de vaguadas costeras en superficie o condiciones de aproximación frontal, por lo que todos los eventos se desarrollaron bajo configuraciones meteorológicas asociadas a fenómenos de estabilidad en la troposfera media (~500 hPa) y estabilidad en la superficie. Es de interés notar que respecto de la estación **O**, de los 16 eventos observados, 11 de ellos se registraron asociados a una configuración del tipo D/Vc y 5 en asociación una condición de tipo PF, de los cuales dos eventos son precedidos por una condición D/Vc. En la figura N°4.28 se muestra la evolución del máximo promedio móvil de 24hrs. del periodo 1999 observado para la estación **O**. Se indica la condición sinóptica observada durante los 16 eventos de alta concentración de MP10 para dicha estación de registro.

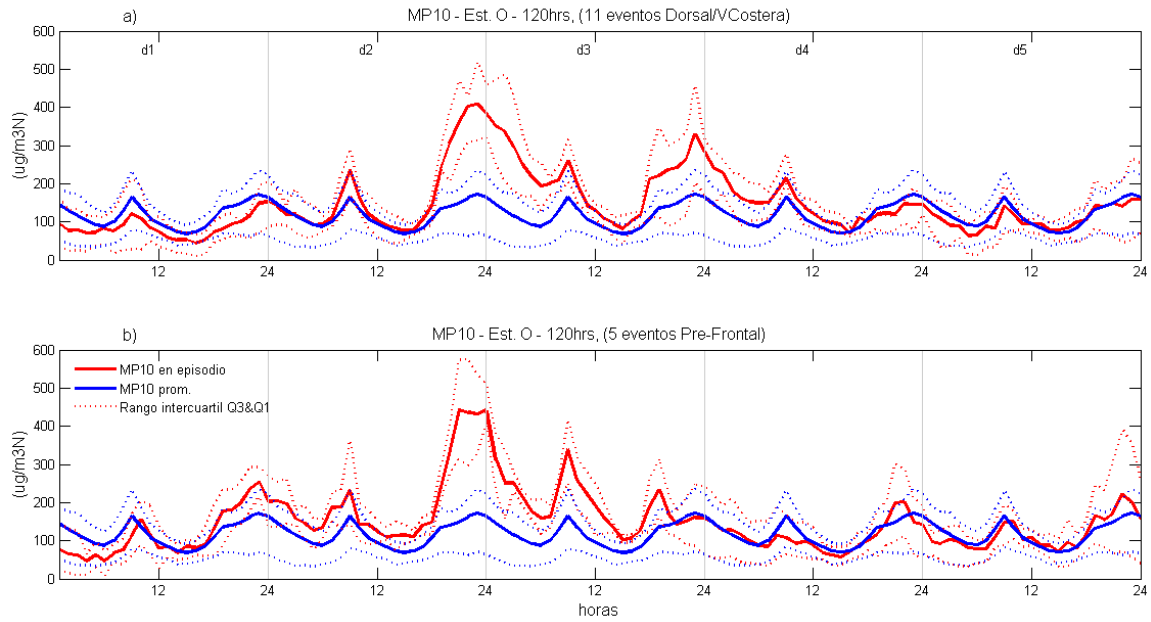


**Figura N°4.28.** Serie de concentración del promedio móvil de 24hrs. de MP10 para la estación de monitoreo de calidad del aire **O** (Pudahuel), durante el periodo 1999. Se indican los niveles de superación de norma diaria y los niveles de episodio crítico de contaminación, a demás de la condición sinóptica asociada D/Vc y PF según tabla 4.1.

#### **4.4. Promedios condicionados según forzante sinóptica en episodios críticos**

##### **4.4.1. Concentraciones de MP10 para la estación O**

A partir del agrupamiento de eventos presentados en la tabla 4.1, se presenta aquí una caracterización de la variación promedio del MP10 horario de la estación **O** para los eventos observados y que fueron agrupados según su condición meteorológica sinóptica correspondiente al tipo D/Vc o PF (figuras 4.29a y 4.29b). Se observa en ambos casos un aumento global de las concentraciones de MP10 respecto del promedio que comienza a partir de la noche del día 2 y se mantiene hasta la mañana del día 4 para los días con D/Vc y comienza a partir de la noche del día 1 hasta la tarde del día 3 en el caso de los días con PF. El aumento significativo de las concentraciones se observa en ambos casos durante la noche del segundo día, siendo precedidos por un peak matinal de mediana intensidad del orden de ~ 200 a 230 ug/m<sup>3</sup>N, seguido de un fuerte incremento nocturno que alcanza cerca de ~ 410 ug/m<sup>3</sup>N para la condición de tipo D/Vc y 440 ug/m<sup>3</sup>N para los PF. Ambos máximos ocurren entre las 22 y 24 HL y presentan una variabilidad que va entre ~ 300 ug/m<sup>3</sup>N y 500 ug/m<sup>3</sup>N. Se observa además que claramente estos máximos están fuera del rango de los valores típicos del periodo frío, tanto para el promedio como para el rango intercuartílico (línea color azul). El día 3 es el día del episodio oficial según el índice ICAP, sin embargo, el promedio de las concentraciones horarias muestran una importante disminución de las concentraciones durante la noche hasta alcanzar un mínimo entre las 05 y 06 HL, que antecede a un nuevo peak matinal que es más intenso que el peak del día previo con una concentración entre 250 y 300 ug/m<sup>3</sup>N. El ciclo diario de la configuración tipo D/Vc se repite los días 3 y 4, aunque con menor intensidad de las concentraciones, que decaen rápidamente en la tarde del día 4 y 5 con valores similares a los valores medios del periodo. Durante los episodios con configuraciones PF, las concentraciones comienzan a aumentar progresivamente respecto al promedio del periodo desde la noche del día 1, manteniendo el incremento hasta alcanzar el peak durante la noche del día 2, decayendo rápidamente a partir de las primeras horas del día 3. El peak matinal después de la noche contaminada es más intenso que en el caso de la D/Vc. Sin embargo, durante la tarde del día 3 (día del episodio), las concentraciones vuelven a niveles típicos del periodo. Lo anterior debido probablemente a un rápido cambio en las condiciones sinópticas, que en estos casos suelen estar asociados a inestabilidad frontal.



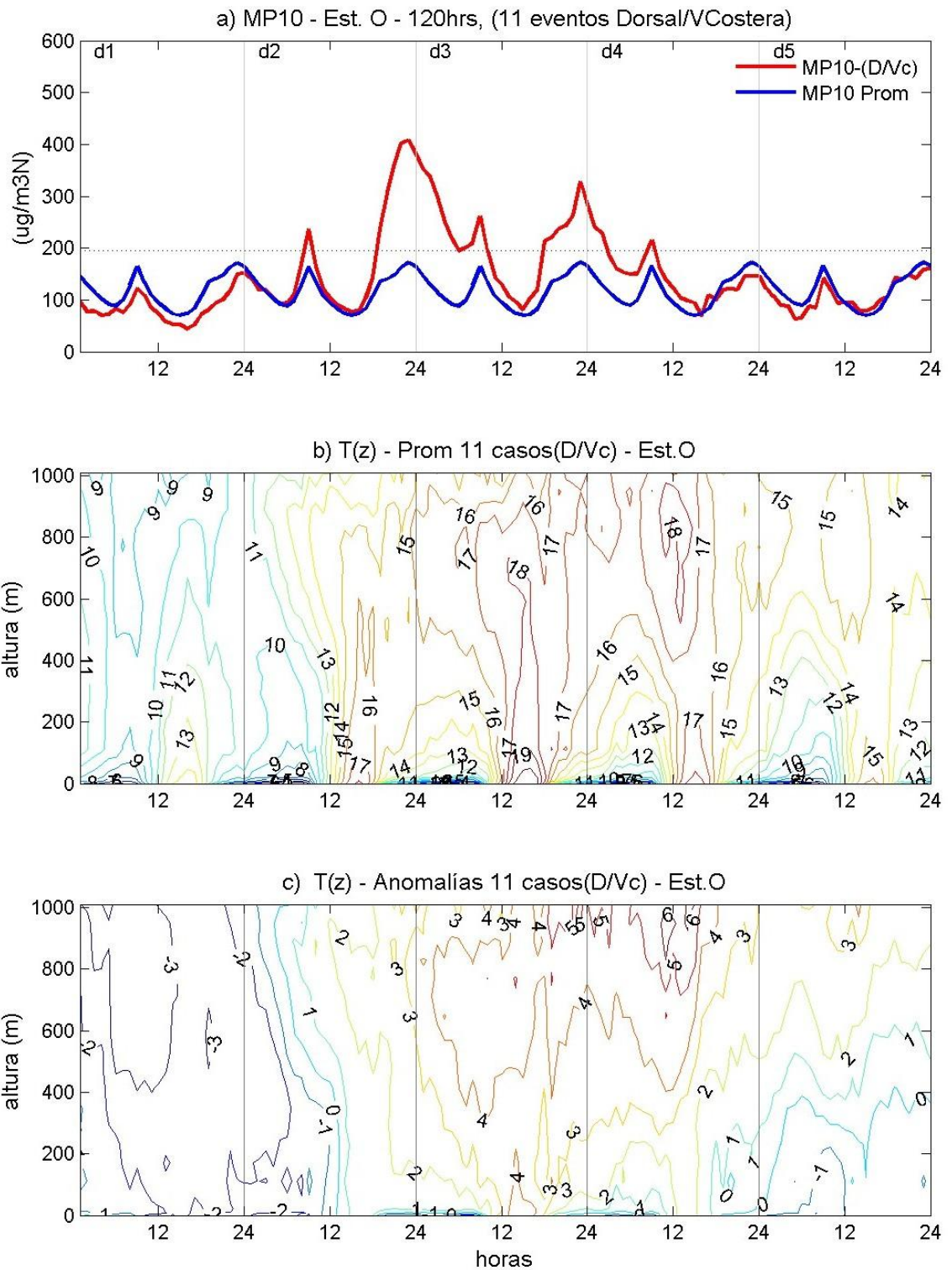
**Figura. N°4.29.** Evolución de las concentraciones medias de MP10 observadas en eventos de contaminación en la Estación O. a) Concentración promedio de 11 eventos bajo una configuración sinóptica del tipo dorsal en altura y vaguada costera en superficie (D/Vc). b) Concentración promedio de 5 eventos bajo una configuración sinóptica del tipo prefrontal (PF).

#### 4.4.2. Distribución de la temperatura en la columna vertical

Una revisión de la distribución de las concentraciones horarias, de la temperatura en la columna vertical y de las anomalías de temperatura respecto al promedio del periodo se muestra en las figuras 4.30 y 4.31. Se observa que en el caso de las configuraciones asociadas a D/Vc, el aumento de concentraciones de MP10 los días 2 y 3 (Figura 4.30a), se desarrolla en un espesor atmosférico de características cálidas (Figura 4.30b). Si utilizamos como referencia la variación de temperatura en el nivel de 500 m, veremos que el incremento comienza sobre dicho nivel a partir de las primeras horas del día 2, alcanzando  $\sim 11^\circ\text{C}$  a las 06 HL. Luego durante el periodo diurno alcanza cerca de  $\sim 16^\circ\text{C}$  a las 16 HL, temperatura que se mantiene durante el periodo nocturno hasta la tarde del día 3, donde alcanza una temperatura máxima del orden de  $18^\circ\text{C}$  a las 18 HL. Le sigue una disminución a  $\sim 16^\circ\text{C}$  durante la noche del día 4 que se mantiene hasta la tarde donde se desarrolla un nuevo máximo en torno a los  $18^\circ\text{C}$ . A partir de las primeras horas del día 5 se ve un nuevo descenso de la temperatura hasta los  $14^\circ\text{C}$ , marcando de este modo la culminación del periodo de calentamiento. En superficie, se observa claramente el ciclo diario y el incremento progresivo de la temperatura desde  $14^\circ\text{C}$  el día 1 a  $17^\circ\text{C}$  el día 2 hasta alcanzar un máximo promedio del orden de  $\sim 20^\circ\text{C}$  del día 3,  $19^\circ\text{C}$  el día 4 y cerca de

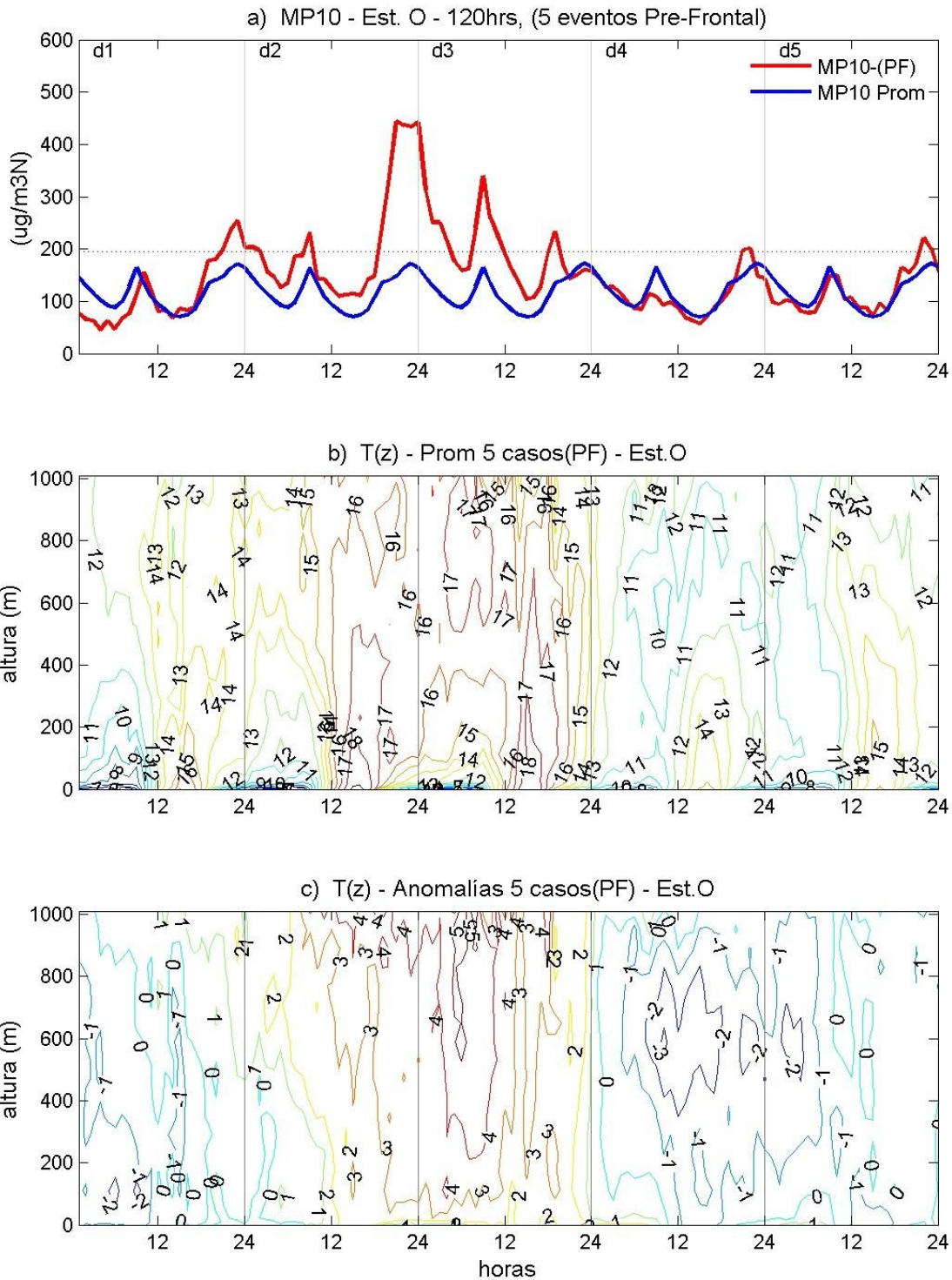
16°C el día 5. Este periodo cálido se puede atribuir directamente a la forzante sinóptica, donde la condición de subsidencia sobre la zona central intensifica el gradiente térmico sobre la cuenca, reforzando la inversión térmica nocturna. En efecto, durante el día de mayor concentración se observa una fuerte estratificación nocturna, con anomalías positivas de temperatura respecto al promedio del periodo frío y en el nivel de 200 m, cercanas a 3°C y 2°C el día 2 y 3 respectivamente (Figura 4.30c). Cerca de los 500 m de altura las anomalías positivas alcanzan valores del orden de ~ 4°C, y a los 1000 se observan anomalías de ~ 5°C en la noche del día 3 y de 6°C el día 4. Cabe indicar que las concentraciones medias de MP10 en estos eventos de contaminación seleccionados se mantienen altas la noche del día 2 y 3, por lo que se observa un desfase respecto al máximo calentamiento en el seno de la cuenca.

En el caso de los días asociados a una condición PF, las concentraciones de MP10 se incrementan fuertemente después de las 18 HL, del día 2 (Figura 4.31a). La temperatura de la columna atmosférica también se incrementa a partir del día 2, alcanzando al igual que en el caso de las D/Vc, un calentamiento generalizado en el espesor que se mantiene hasta el día 3, con una temperatura del orden de ~16°C en el nivel de 500 m (Figura 4.31b). La columna atmosférica presenta anomalías positivas del orden de 3 y 4°C durante los días de las máximas concentraciones (Figura 4.31c). A diferencia del caso asociado a la condición D/Vc, las temperaturas del espesor durante la condición PF cambian a partir de las primeras horas del día 4 evidenciando un enfriamiento generalizado en el espesor que está asociado a un cambio en la forzante sinóptica, que en este caso, obedece a la inestabilidad frontal sobre la cuenca de Santiago.



**Figura N°4.30.** Distribución vertical de la temperatura observada en la Torre La Platina y LapRass para el periodo frío. a) Concentraciones promedio de MP10 de 11 episodios en condiciones D/Vc. b) Distribución vertical de temperatura para los días de episodios asociados a D/Vc. c) Distribución anomalías de temperatura para los días episodios asociados a D/Vc.





**Figura N°4.31.** Distribución vertical de la temperatura observada en la Torre La Platina y LapRass para el periodo frío. a) Concentraciones promedio de MP10 de 5 episodios en condiciones PF. b) Distribución vertical de temperatura para los días de episodios asociados a PF. c) Distribución anomalías de temperatura para los días episodios asociados a PF.

#### 4.4.3. Estabilidad en la columna vertical

Un análisis de la variación de la estabilidad en la columna vertical para los eventos según su tipo y forzante sinóptica, muestra que la estabilidad superficial  $\Delta T_{8T2}$ , se incrementa respecto de los valores típicos a partir de la noche del día 2 hasta el amanecer del día 3 (figuras 4.32a y 4.32b). En el caso de D/Vc, se alcanza un máximo de estabilidad al final de la noche, con valores medios del orden de  $\sim 3,5^{\circ}\text{C}$  y una variabilidad de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . El aumento de concentraciones entre el día 2 y 3, es consistente con el incremento de estabilidad. En el caso PF, la estabilidad superficial también aumenta a partir de la noche del día 2 hasta el amanecer del día 3, día del episodio, pero con valores medios que apenas superan el cuartil superior de la variabilidad típica del periodo, alcanzando  $\sim 3^{\circ}\text{C}$  al final de la noche, con una variabilidad también baja del orden de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Lo anterior es de interés considerando que las concentraciones horarias de MP10 en ambos casos alcanzan valores máximos horarios comparables.

La evolución de la estabilidad después del día del peak, también se diferencia notoriamente. Entre la noche del día 3 y el amanecer del día 4 los valores de estabilidad siguen altos para la condición D/Vc, mientras que para el caso de PF, se observa una disminución importante, alcanzando valores inferiores a los valores típicos, lo que es consistente con la evolución temporal de las configuraciones sinópticas asociadas (paso de sistema sistemas frontales).

En el nivel de superficial inmediatamente superior, la estabilidad representada por  $\Delta T_{22T8}$  sigue una evolución similar al nivel más cercano a superficie, aunque el incremento de la estabilidad después de atardecer es menos marcado que en el espesor inferior, lo que está asociado al efecto de la superficie en las observaciones a 2 m (figuras 4.33a y 4.33b). El incremento de  $\Delta T_{22T8}$  se inicia en ambos casos en las primeras horas del día 2 con el máximo de estabilidad al final de la noche, con un valor medio máximo cercano a  $\sim 2,5^{\circ}\text{C}$ . La intensificación de la estabilidad se observa a partir de la noche del día 2 y hasta el amanecer del día 3, al igual que el nivel inferior, con una estabilidad máxima al final de la noche en el caso de D/Vc y cerca de las 03 HL en el caso de PF, con intensidades medias del orden de  $\sim 3,5^{\circ}\text{C}$  y  $\sim 3^{\circ}\text{C}$ , respectivamente.

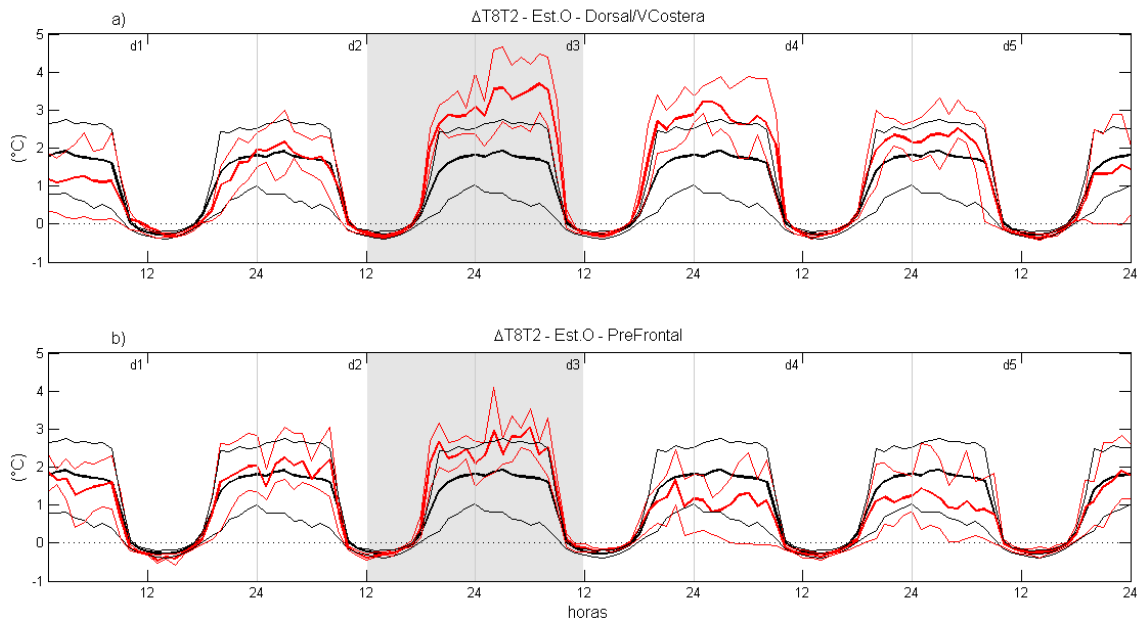
En consecuencia, se concluye que los niveles de MP10 se incrementan para el caso D/Vc y PF durante las noches en que la estabilidad superficial  $\Delta T_{8T2}$  también aumenta, alcanzando su máximo valor medio al amanecer del día siguiente. Para  $\Delta T_{22T8}$  la estabilidad máxima se observa al final de la noche en D/Vc y durante la noche para PF. La estabilidad máxima observada para  $\Delta T_{8T2}$  y  $\Delta T_{22T8}$  es unos  $0,5^{\circ}\text{C}$  mayor en el caso D/Vc respecto del caso PF.

La estabilidad media máxima se mantiene sobre el promedio del periodo al menos durante dos días en los eventos D/Vc, mientras que para los eventos PF, solo lo hace durante uno, siendo esto consistente con el periodo de ocurrencia de los máximos de concentraciones de MP10 observados.

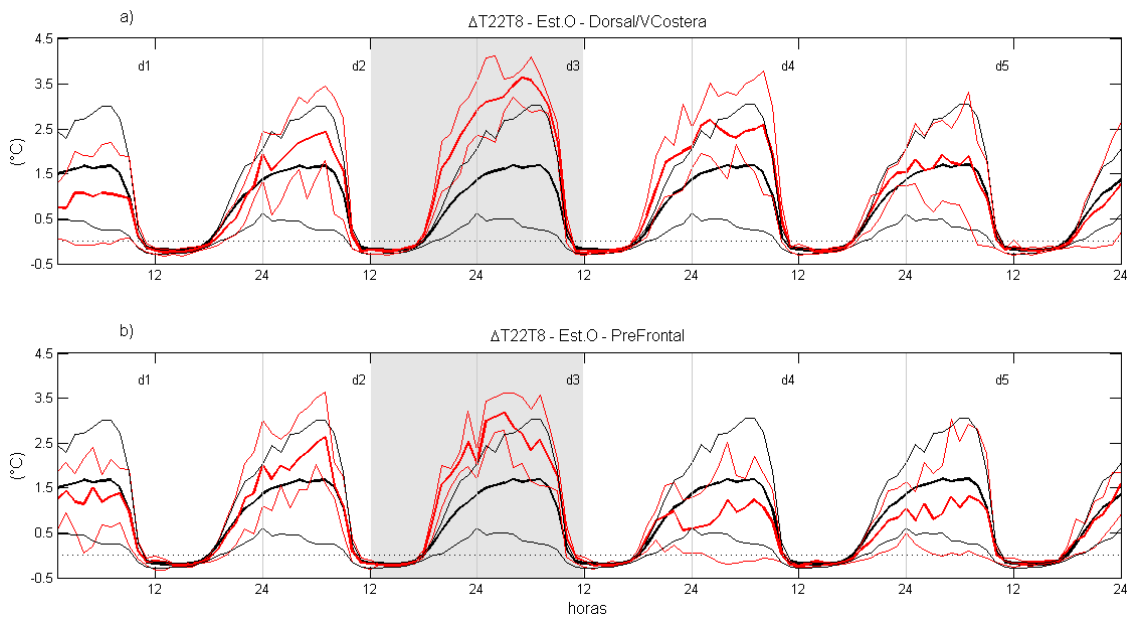
Una inspección de la estabilidad entre los 22 y 170 m muestra que los máximos valores de estabilidad se perciben también al final de la noche y durante la noche (figura 4.34). Sin embargo, si bien los valores de estabilidad superan el promedio, se mantienen dentro de la variabilidad típica del periodo observado. En el caso de D/Vc se observan valores sobre el promedio los días 3, 4 y 5, un día más en comparación a los niveles superficiales (figura 4.34a). La figura 4.34b, por su parte, muestra que la estabilidad máxima para casos PF, se da entre las primeras horas de la noche del día 2 y la madrugada del día 3.

La estabilidad en niveles superiores  $\Delta T_{410T170}$ , muestra para el caso D/Vc y PF un comportamiento distinto a los valores más cercanos a superficie, con un máximo cerca de la 10 HL y un mínimo pasado el medio día. Para el caso D/Vc, los valores se mantienen entre los valores típicos hasta el día 2, aumentando en la mañana del día 3 y los días 4 y 5, donde al máximo supera el valor medio mostrando un desfase respecto al día del episodio (figura 4.35a). Para el caso PF se observa un máximo matinal solo el día 2, el resto de los días los valores se mantienen en el rango de los valores típicos (figura 4.35b).

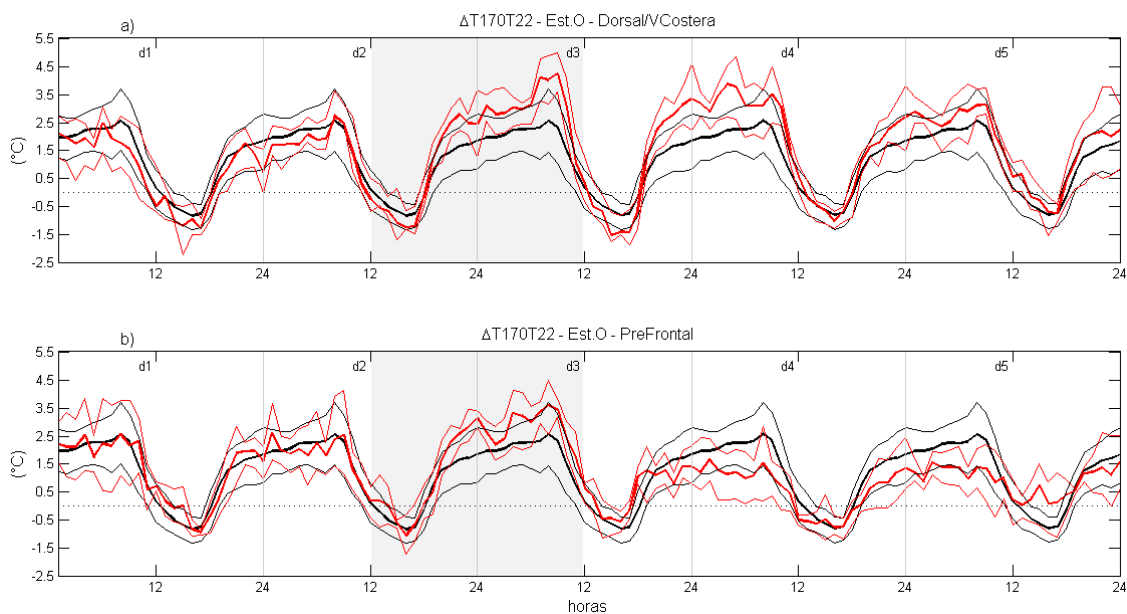
Los niveles de  $\Delta T_{770T530}$  y  $\Delta T_{950T770}$  (no mostrados) presentan en ambos casos valores medios que se mantienen en el rango de los valores típicos que oscila entre  $\sim 0.5$  y  $-1^\circ\text{C}$ , y un rango intercuartilítico de  $\pm 1.5^\circ\text{C}$ . En ambos niveles, la estabilidad máxima media se presenta ceca de las 06 HL y se asocia en general a una condición isotérmica durante la noche con un mínimo cerca de las 14 HL. En el nivel representado por  $\Delta T_{770T530}$ , los valores máximo de estabilidad para D/Vc y PF del orden del tercer cuartil representativo de la variación máxima del periodo. Lo anterior entre el día 2 y 5 para D/Vc y días 4 y 5 para PF. En  $\Delta T_{950T770}$  la condición de estabilidad presenta los valores medios en el rango de valores típicos para ambos casos. Al igual que el nivel inferior presenta un máximo cerca de las 06 HL y un mínimo del pues del mediodía, que varía entre 0 y  $-1^\circ\text{C}$ .



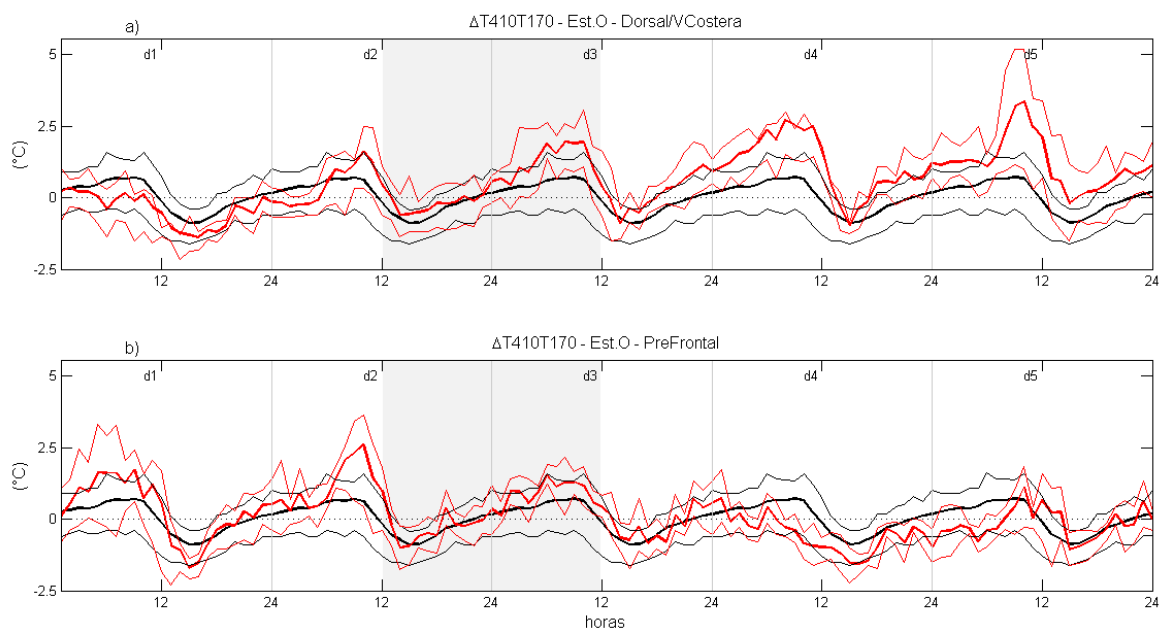
**Figura. N°4.32.** Estabilidad atmosférica superficial para  $\Delta T_{8T2}$  y su variación intercuartílica en eventos de contaminación en la estación **O** para una ventana de 120hrs. Se presenta la estabilidad superficial promedio del periodo frío (líneas negras) y durante eventos (líneas rojas), a) Estabilidad asociada a Dorsal y Vaguada Costera. b) Estabilidad asociada a condiciones Pre-frontal.



**Figura N°4.33.** Estabilidad atmosférica superficial para  $\Delta T_{22T8}$  y su variación intercuartílica para el promedio del periodo (color negro) y en eventos de contaminación en la estación **O** para una ventana de 120hrs (color rojo). El área sombreada indica los días con altas concentraciones. a) Condiciones de Dorsal y Vaguada Costera. b) Condición Pre-frontal.



**Figura N°4.34.** Estabilidad atmosférica superficial para  $\Delta T_{170T22}$  y su variación intercuartilica para el promedio del periodo (color negro) y en eventos de contaminación en la estación **O** para una ventana de 120hrs (color rojo). El área sombreada indica los días con altas concentraciones. a) Condiciones de Dorsal y Vaguada Costera. b) Condición Pre-frontal.



**Figura N°4.35.** Estabilidad atmosférica superficial para  $\Delta T_{410T170}$  y su variación intercuartilica para el promedio del periodo (color negro) y en eventos de contaminación en la estación **O** para una ventana de 120hrs (color rojo). El área sombreada indica los días con altas concentraciones. a) Condiciones de Dorsal y Vaguada Costera. b) Condición Pre-frontal.

## 4.5. Promedios condicionados según peaks matinales y nocturnos de MP10

### 4.5.1. Concentraciones de MP10 estación O

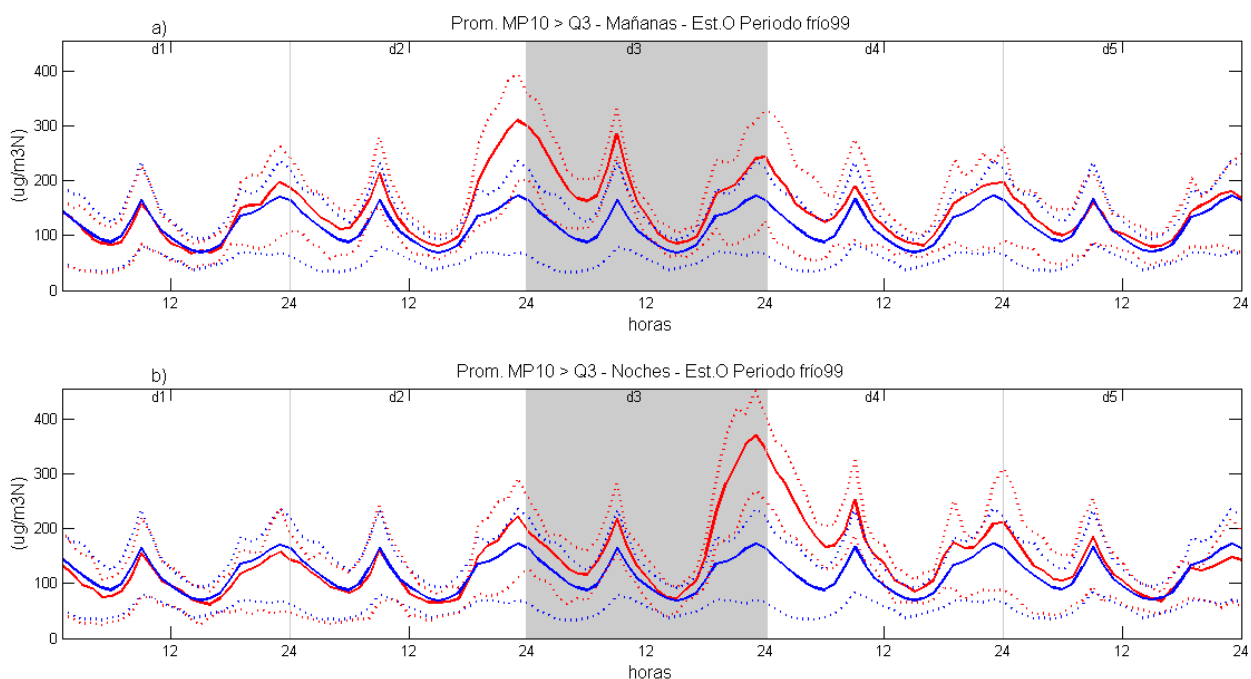
Otra manera de caracterizar el ciclo diario de periodos de alta contaminación por MP10 para la estación O entre los meses de abril y agosto, es a través del uso de promedios condicionados de los máximos nocturnos y matinales observados, discriminando de esta manera los días en que las concentraciones fueron especialmente altas.

Para esto y con el propósito de incluir el mayor número de máximos matinales y nocturnos, se calculó el promedio simple de MP10 para un rango de 8 horas considerado representativo del período nocturno (entre las 20 y 03 HL) y se calculó el promedio simple para un rango de 4 horas (entre las 07 y 10 HL) representativo del periodo matinal. Se definió como día o noche contaminada, cuando los promedios simples de los días y noches fueron mayores al tercer cuartil Q3 del conjunto de días del periodo. Con el objetivo de tener comprensión de la evolución de las concentraciones horarias de MP10 de los días seleccionados, se presentan los ciclos diarios en ventanas temporales de 120 hrs (5 días).

La figura 4.36a muestra que para los días de mañanas con altas concentraciones matinales se observa un periodo global de aumento en las concentraciones de MP10 respecto al promedio del periodo. Este aumento global comienza al atardecer del primer día y se mantiene hasta el amanecer del quinto día seleccionado, mientras que un aumento significativo de las concentraciones de MP10 se observa entre el atardecer del segundo día y el final de la noche del día cuarto. El peak matinal promedio de los días seleccionados (zona sombreada), se observa a las 10 HL y son precedidos por concentraciones altas durante la noche anterior. Presentan una baja variabilidad y alcanzan un máximo de  $\sim 285 \text{ ug/m}^3$ , lo que equivale al doble del máximo matinal promedio del periodo. La evolución de las concentraciones muestra un mínimo bien marcado después del medio día y un nuevo incremento a partir de las 18 HL con un máximo cerca de las 24 HL del orden de  $\sim 250 \text{ ug/m}^3$ , unos  $50 \text{ ug/m}^3$  menor al peak de la noche del día anterior. El máximo matinal del día siguiente es de  $\sim 180 \text{ ug/m}^3$ , lo que equivale a una reducción del  $\sim 30\%$  respecto al peak matinal del día previo.

Para los días con noches de concentraciones altas (figura 4.36b), se observa el mismo patrón de aumento global de las concentraciones que se inicia la noche del segundo día hasta el quinto día y un periodo de aumento significativo desde la noche del peak (tercer día) hasta la

mañana el cuarto día. El máximo nocturno se presenta también cerca de las 23 HL con una gran variabilidad (zona sombreada). La magnitud del peak es del orden de  $\sim 375 \text{ ug/m}^3\text{N}$ , lo que equivale a más del doble del máximo promedio nocturno del periodo. Respecto a la evolución previa de las concentraciones, se observa que las concentraciones de la noche anterior y la mañana previa son moderadamente más altas que el promedio con valores de  $\sim 200 \text{ ug/m}^3\text{N}$  y  $220 \text{ ug/m}^3\text{N}$ , respectivamente. En cuanto a la evolución de las concentraciones después del máximo de la noche, se observa un descenso paulatino durante la noche hasta alcanzar un mínimo antes del peak matinal ( $\sim 160 \text{ ug/m}^3\text{N}$ ), que es un  $\sim 40\%$  mayor al mínimo del día anterior. El peak matinal de  $\sim 250 \text{ ug/m}^3\text{N}$ , también es un  $15\%$  mayor que el día previo. Lo anterior muestra que en general un peak matinal intenso es antecedido típicamente por una noche de concentraciones altas.



**Figura N°4.36** Ciclo medio de MP10 en la estación O para días con mañanas y noches contaminadas (color rojo) y no contaminadas (color azul), periodo frío 1999. a) Días con mañanas contaminadas. b) Días con noches contaminadas. Las líneas punteadas indican el rango intercuartílico.

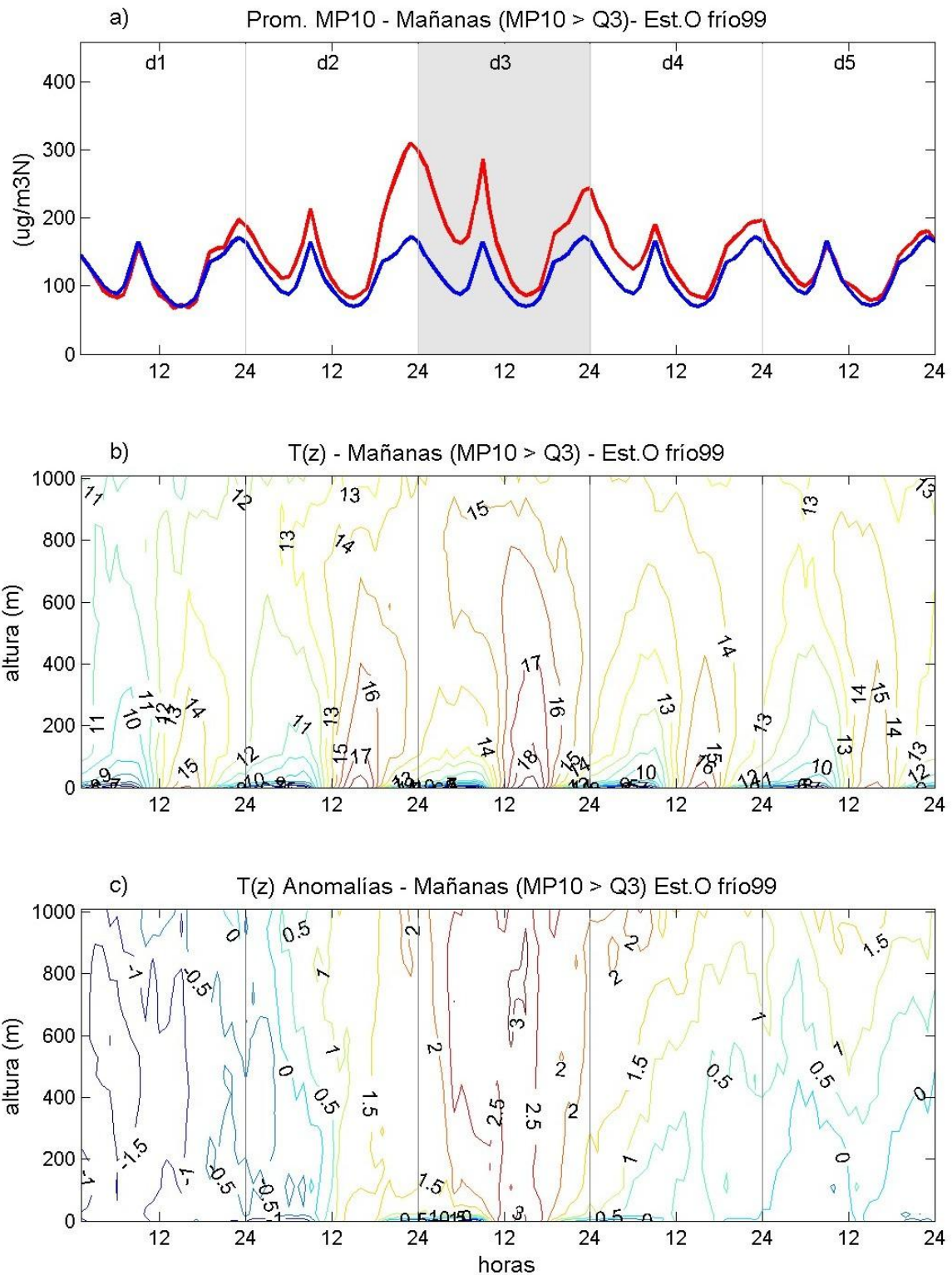
#### 4.5.2. Distribución de la temperatura en la columna vertical

Los días agrupados estadísticamente por sus noches y mañanas con altas concentraciones de MP10, presentan en la columna vertical una estructura térmica similar a la observada durante los eventos de contaminación asociados a las condiciones D/Vc y PF. La distribución media de temperatura en la columna muestra con claridad durante el día del peak matinal (figura 4.37a) una estratificación nocturna entre la superficie y los ~ 300 m (figura 4.37b), lo que es consistente con el predominio de anomalías térmicas positivas entre los 500 y 1000 m de altura y que alcanzan un máximo del orden de  $\sim 3.0^{\circ}\text{C}$ , el mismo día después de las 14 HL (Figura 4.37c).

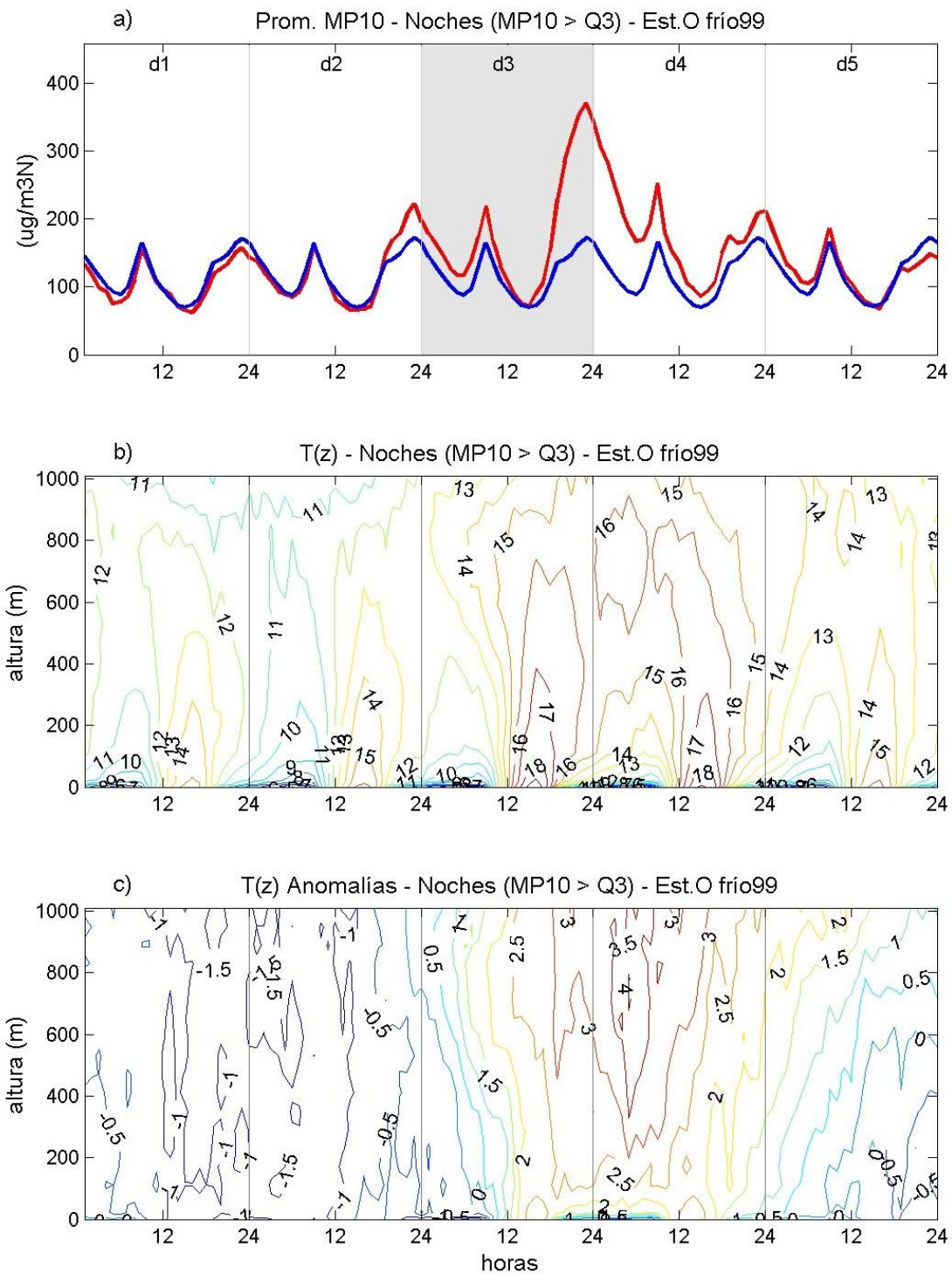
Las noches con altas concentraciones (figura 4.38), presentan también un calentamiento del espesor durante la noche del peak, que se mantiene hasta el día siguiente con un máximo de temperatura entre los 500 y 1000 m del orden de  $\sim 16^{\circ}\text{C}$  entre las 00 y 06 HL, lo que genera un fortalecimiento de la inversión térmica superficial al amanecer (figura 4.38b). Este máximo de temperatura es consistente con las anomalías positivas de temperatura observadas en el espesor, cuyo máximo valor es del orden de  $\sim 3.6^{\circ}\text{C}$  en torno a las 06 HL y que también se ubica entre los 500 y 1000 m.

Respecto de las mañanas y noches de concentraciones bajas (no mostrado), se observó en ambos casos, que las concentraciones de MP10 se mantuvieron en niveles inferiores a  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  unas 12 horas antes y 12 horas después del mínimo de concentración ( $< 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), lo que indica que las condiciones meteorológicas fueron especialmente favorables a la remoción de los contaminantes. Una inspección de las temperaturas mostró en ambos casos un enfriamiento entre los 500 y 1000 m, con anomalías térmicas negativas del orden de  $\sim 2.5^{\circ}\text{C}$  para las mañanas y  $\sim 3.0^{\circ}\text{C}$  en las noches de bajas concentraciones.





**Figura N°4.37.** Distribución vertical y ciclo diario de la temperatura observada en la Torre La Platina y el LapRass para días con altas concentraciones matinales de MP10. a) Concentraciones promedio de MP10 durante el periodo frío (color azul) y para los días con altas concentraciones matinales (color rojo). b) Distribución vertical de temperatura para los días de altas concentraciones matinales. c) Distribución vertical de las anomalías de temperatura para los días de mañanas con altas concentraciones.



**Figura N°4.38.** Distribución vertical y ciclo diario de la temperatura observada en la Torre La Platina y el LapRass para días con altas concentraciones nocturnas de MP10. a) Concentraciones promedio de MP10 durante el periodo frío (color azul) y para los días con altas concentraciones nocturnas (color rojo). b) Distribución vertical de temperatura para los días de altas concentraciones nocturnas. c) Distribución vertical de las anomalías de temperatura para los días de mañanas con altas concentraciones.

### 4.5.3. Estabilidad en la columna vertical

En las figuras 4.39a se evalúa el comportamiento de la estabilidad en la columna vertical sobre Santiago para los días con altas concentraciones de MP10 durante la mañana y en la noche. Se ha seleccionado una ventana temporal de 5 días, donde el tercer día corresponde al día seleccionado.

Se observa que la estabilidad superficial representada por  $\Delta T_{22T8}$ , durante los días con peak matinal alto es más intensa que los días previos, con diferencias de temperatura que alcanzan cerca de  $\sim 3^{\circ}\text{C}$  entre las 04 y 09 HL, lo que equivale al doble del valor promedio del periodo a la misma hora (figura 4.39a). Las noches de concentraciones altas muestran valores de estabilidad superficial que crecen rápidamente a partir de las 18 HL intensificándose después de la medianoche, particularmente en horas cercanas al amanecer (figura 4.39b).

Respecto de la estabilidad representada por  $\Delta T_{22T8}$ , se observa la misma evolución que el nivel inmediatamente inferior, tanto para las mañanas como para las noches de concentraciones altas (figuras 4.40a y 4.40b). La diferencia entre ambos niveles se presenta principalmente en la evolución de la noche a partir de las 18:00 HL que, a diferencia del nivel inferior, muestra un incremento paulatino de la estabilidad hasta alcanzar su valor máximo al final de la noche.

En la evolución diaria de  $\Delta T_{170T22}$  se observa cómo el efecto superficial de la estabilidad comienza a manifestarse progresivamente durante la noche hasta alcanzar el máximo de intensidad al final de la noche (Figuras 4.41a y 4.41b). Lo anterior deja claro ya, que las mañanas con altas concentraciones son el resultado de una noche contaminada, donde la estabilidad se intensifica progresivamente hasta el amanecer. La diferencia de temperatura en este espesor muestra que el periodo negativo ( $\Delta T < 0$ ), se inicia al mediodía y perdura hasta las 18 HL, mostrando diferencia del orden de  $\sim 1^{\circ}\text{C}$ , lo que es consistente con un mayor distanciamiento de la superficie y la disminución de la temperatura en las primeras decenas de metros.

Se debe considerar que al seleccionar los ciclos diarios de estabilidad en función de las altas concentraciones de MP10, no se puede discriminar por ejemplo, la forzante sinóptica que está modulando el comportamiento de dicha estabilidad. Lo anterior implica que los valores de la estabilidad presentan cambios menos marcados en comparación a los valores de estabilidad

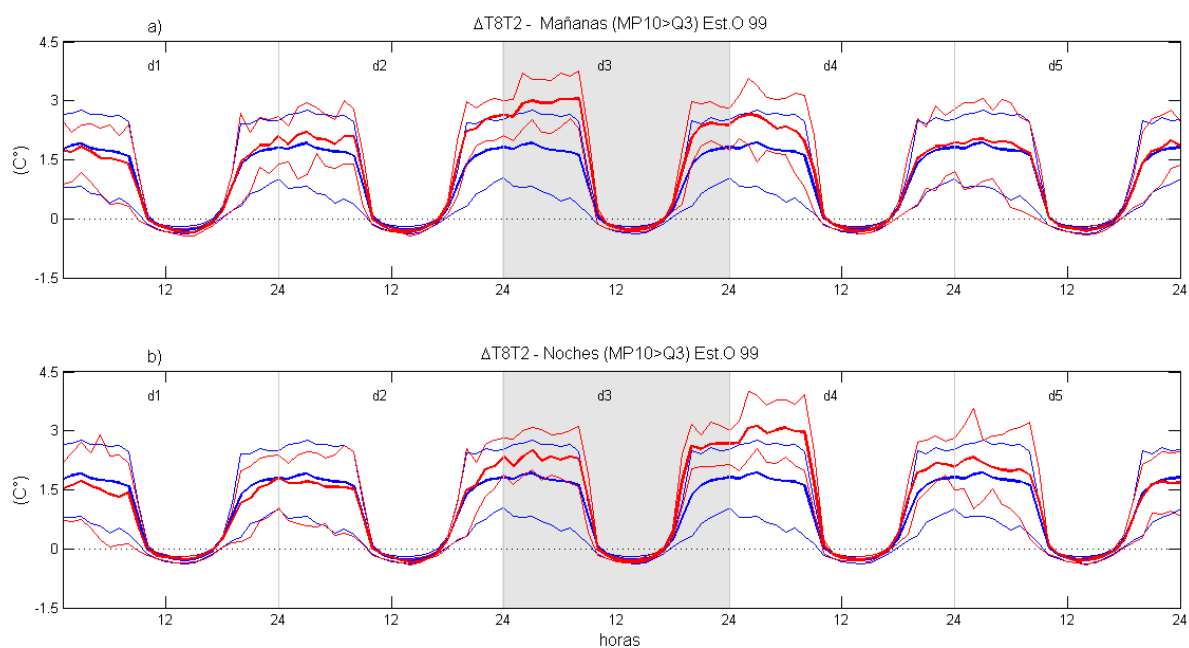
observados en los casos seleccionados a partir de la condición meteorológica predominante. Lo anterior queda de manifiesto, por ejemplo, al comparar los valores de estabilidad del nivel  $\Delta T_{170T22}$ , que para los casos de condición sinóptica D/Vc y PF, alcanzan un máximo del orden de  $3.5^{\circ}\text{C}$ , mientras que en la selección de días con concentraciones altas alcanza valores del orden de  $3^{\circ}\text{C}$ .

La estabilidad a mayor altura  $\Delta T_{410T170}$  (no mostrado) muestra para las noches y mañanas con altas concentraciones, que los valores son comparables a los valores típicos del período. A diferencia de los niveles inferiores, en las mañanas contaminadas se observa una estabilidad levemente superior al promedio, mientras que para las noches contaminadas se observa un máximo durante la mañana previa y un incremento progresivo a partir de las 20 HL. La intensidad de la diferencia de temperatura en este espesor, muestra una disminución de sus valores medios, que fluctúan en torno a  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Cabe indicar que los datos de  $\Delta T_{170T22}$  se asocian a un espesor 148 m entre la torre y el perfilador, mientras que para  $\Delta T_{410T170}$  se asocia a un espesor de 240 m.

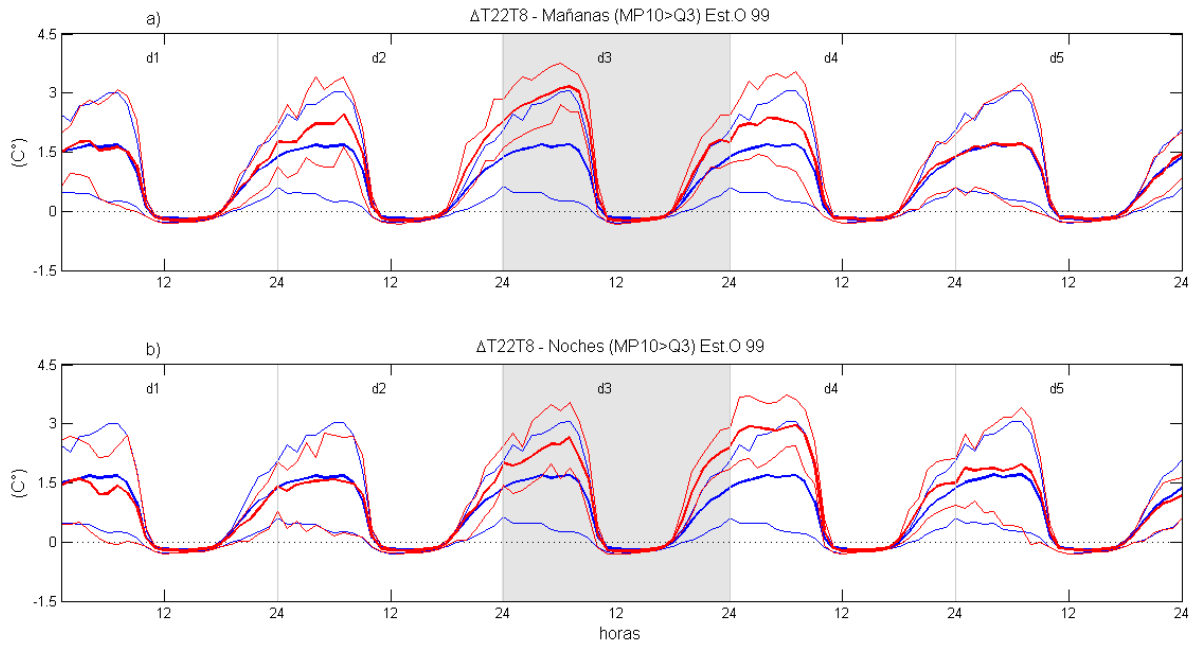
A mayor altura, las estabilidades  $\Delta T_{770T530}$  y  $\Delta T_{950T770}$  (no mostrado) también presentan valores en el rango típico, pero con una disminución de la diferencia de temperatura respecto a niveles inferiores con fluctuaciones entre  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , lo que indica que el perfil de temperatura en estos niveles ha disminuido de manera importante su tasa de enfriamiento, tendiendo el perfil de temperatura a una condición isotermal.

En resumen, la estabilidad en los primeros 20 metros sobre el sector de monitoreo muestra que el episodio de aumento de concentraciones horarias comienza un día antes con un incremento de la estabilidad superficial al final de la noche del mismo día, lo que puede ser generado por un cambio en la forzante sinóptica y el desarrollo de rasgos de mesoescala. La respuesta a dicha modulación se traduce en un peak matinal moderado de MP10 ( $\sim 200 \text{ ug/m}^3\text{N}$ ). Luego, después del mediodía, se observa típicamente una disminución de las concentraciones horarias como respuesta al efecto del calentamiento superficial, y al desarrollo diurno de la capa límite. Durante este periodo los valores de  $\Delta T$  se mantienen cercanos a la condición de estabilidad neutra cerca de superficie y cercanos una condición isotérmica en niveles superiores (sobre los 170 m). Después de las 18 HL se restablece nuevamente una capa estable pero más intensa que la observada en el periodo de transición de la noche anterior, donde la estabilidad se intensifica rápidamente en superficie y progresivamente en niveles superiores, lo cual generará entre las 20 y 24 HL un fuerte incremento de las concentraciones de MP10 que alcanzan

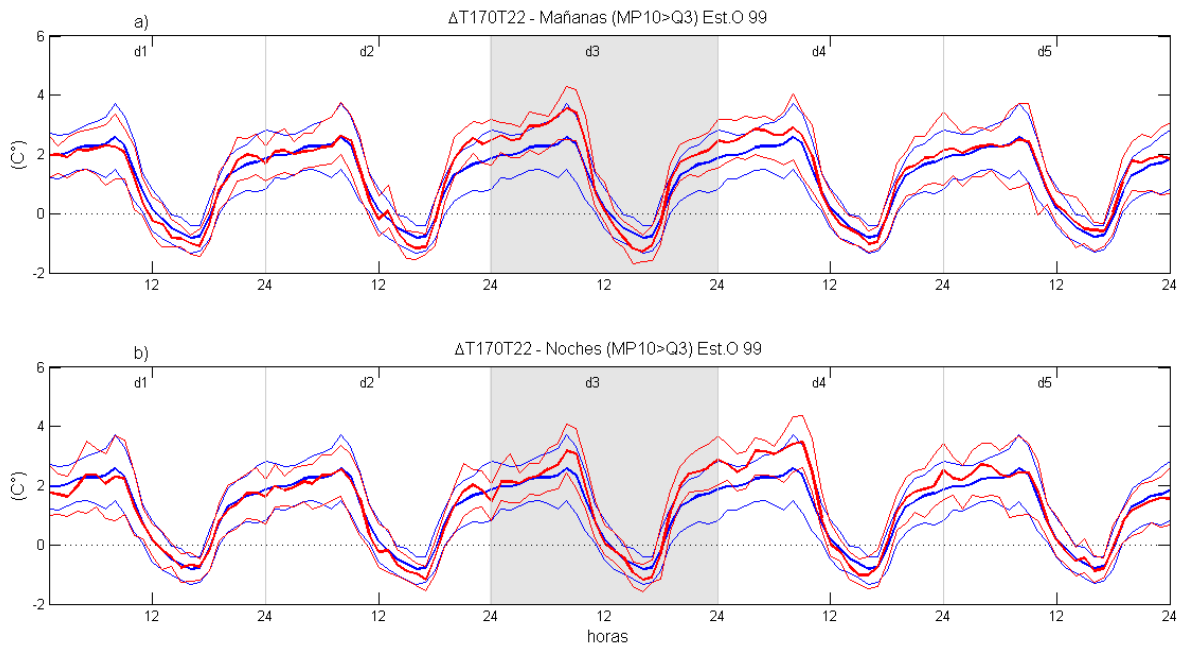
valores medios del orden de  $\sim 350 \text{ ug/m}^3$ , los que decaerán paulatinamente en el transcurso de la noche, mientras que la estabilidad sigue aumentando hasta alcanzar su máxima intensidad al amanecer. Lo anterior provoca que cerca de las 9 y 10 HL, se genere un máximo matinal de MP10 ( $\sim 250 \text{ ug/m}^3$ ) mucho más intenso que el observado el día anterior, que disminuirá nuevamente en la tarde alcanzando un mínimo. La estabilidad superficial vuelve a responder al ciclo diario aumentando después de la 18 HL, aunque con una magnitud menor que el día anterior. Las concentraciones de MP10 comienzan a disminuir progresivamente en los días siguientes, con lo cual concluye el episodio de contaminación y la intensificación de la estabilidad superficial y en la columna atmosférica sobre el lugar de observación.



**Figura N°4.39.** Ciclo medio de 120 horas para la estabilidad superficial  $\Delta T8T2$  y su variabilidad para los días con noches y mañanas contaminadas (área sombreada). a) Estabilidad superficial  $\Delta T8T2$  mañanas (color azul). b) Estabilidad superficial  $\Delta T8T2$  noches (color rojo).



**Figura N°4.40.** Ciclo medio de 120 horas para la estabilidad superficial  $\Delta T_{22T8}$  y su variabilidad para los días con noches y mañanas contaminadas (área sombreada). a) Estabilidad superficial  $\Delta T_{22T8}$  mañanas. b) Estabilidad superficial  $\Delta T_{22T8}$  noches.



**Figura N°4.41.** Ciclo medio de 120hrs para la estabilidad superficial  $\Delta T_{170T22}$  y su variabilidad los días con noches y mañanas contaminadas y no contaminadas (área sombreada). a) Estabilidad superficial  $\Delta T_{170T22}$  mañanas. b) Estabilidad superficial  $\Delta T_{170T22}$  noches.

#### **4.5.4. Perfiles verticales de temperatura**

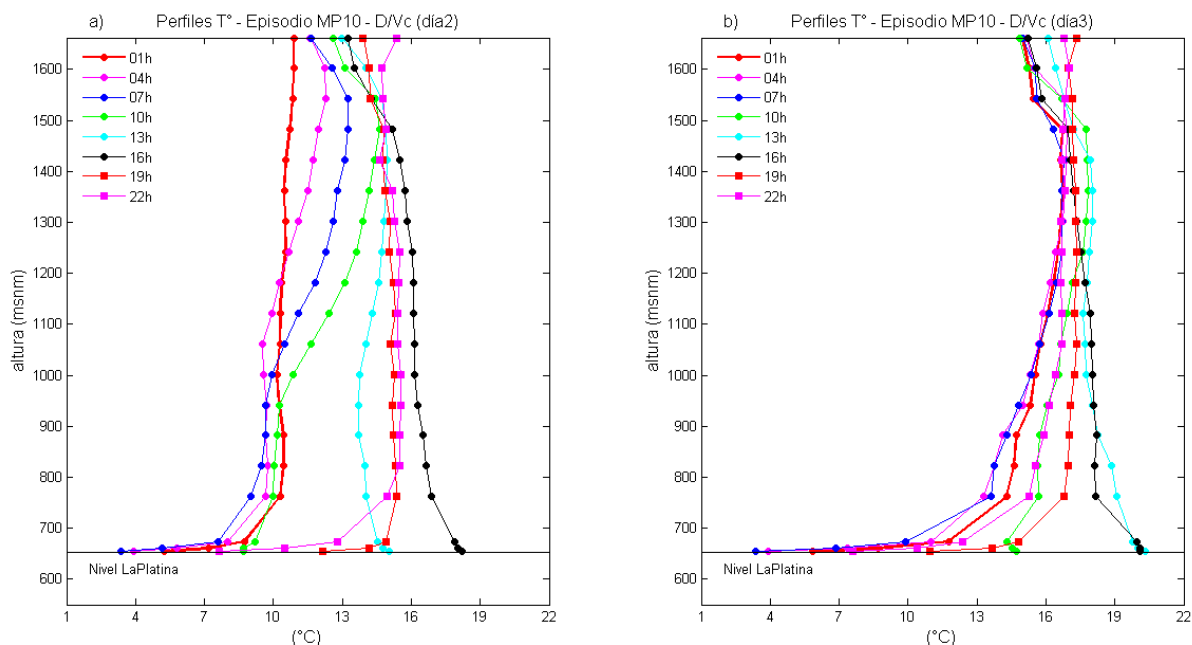
En el presente apartado se presenta una caracterización de los perfiles verticales de temperatura promedio y su variación durante el periodo frío, tanto para los días con episodios de contaminación asociados a las configuraciones sinópticas D/Vc y PF, como para los días seleccionados debido a altas concentraciones de MP10 al final de la noche y durante el periodo nocturno. En este último caso se agregan valores de temperaturas medias observadas en las estaciones de la red de calidad del aire (Red Macam), y en las estaciones de Lo Prado y Entel, que operaron en la región durante el periodo de interés.

Para observar el comportamiento de los datos sobre la cuenca de Santiago, se presentan las alturas de las estaciones respecto al nivel medio del mar. Por ejemplo, la estación de Lo Prado (sector poniente de la ciudad) se ubica a ~1065 msnm. La Torre Entel (centro de la ciudad), se ubica a unos ~ 681 msnm. Las estaciones de la red oficial de calidad del aire, se distribuyen en distintos lugares del gran Santiago siendo la estación **O** (Pudahuel) representativa del sector urbano de la zona poniente de la ciudad (ver capítulo 3).

##### **4.5.4.1. Perfiles verticales de temperatura condicionados según forzante sinóptica observada durante episodios críticos**

En la figuras 4.42 y 4.43 se muestran los perfiles promedios de temperatura calculados para los eventos críticos asociados a condiciones D/Vc y PF. En la figura 4.42a se muestran para el caso D/Vc, los perfiles medios de temperatura cada 4 horas, entre las 01 HL y las 22 HL del día en que se observó el máximo aumento de las concentraciones horarias de MP10. Se observa que el enfriamiento y calentamiento superficial definen el perfil en las primeras decenas de metros (~ 750 msnm), presentando una pendiente más suave entre este nivel y los ~ 1000 msnm, nivel desde el cual se observa hacia niveles superiores un proceso de calentamiento progresivo que alcanza su máximo a las 16 HL. Lo anterior es consistente con la máxima temperatura observada en superficie. El perfil de las 19 y 22 HL muestra cómo el espesor sobre La Platina, entre los ~ 750 y ~ 1300 msnm se vuelve isotérmico, mientras que en superficie se inicia un rápido enfriamiento. En la figura 4.42b los perfiles entre las 01 y 04 HL muestran que el efecto de enfriamiento superficial se ha intensificado y con ello la estabilidad en las primeras capas, en especial entre superficie y los 100 m sobre La Platina, manteniendo la estabilidad en niveles superiores, con un perfil menos pronunciado hasta los ~ 1300 msnm,

nivel a partir del cual se observa un espesor más bien isotérmico hasta los 1500 msnm. El perfil de la 10 HL muestra que durante el día tres, el espesor es más cálido que el anterior, con una temperatura máxima superficial más alta. Los perfiles de las 13 y 16 HL presentan gran similitud entre sí hasta un nivel cercano a los ~ 1200 msnm. El perfil de las 19 HL es comparable al día anterior, mientras que el perfil de las 22 HL muestra el inicio de un nuevo ciclo de enfriamiento.

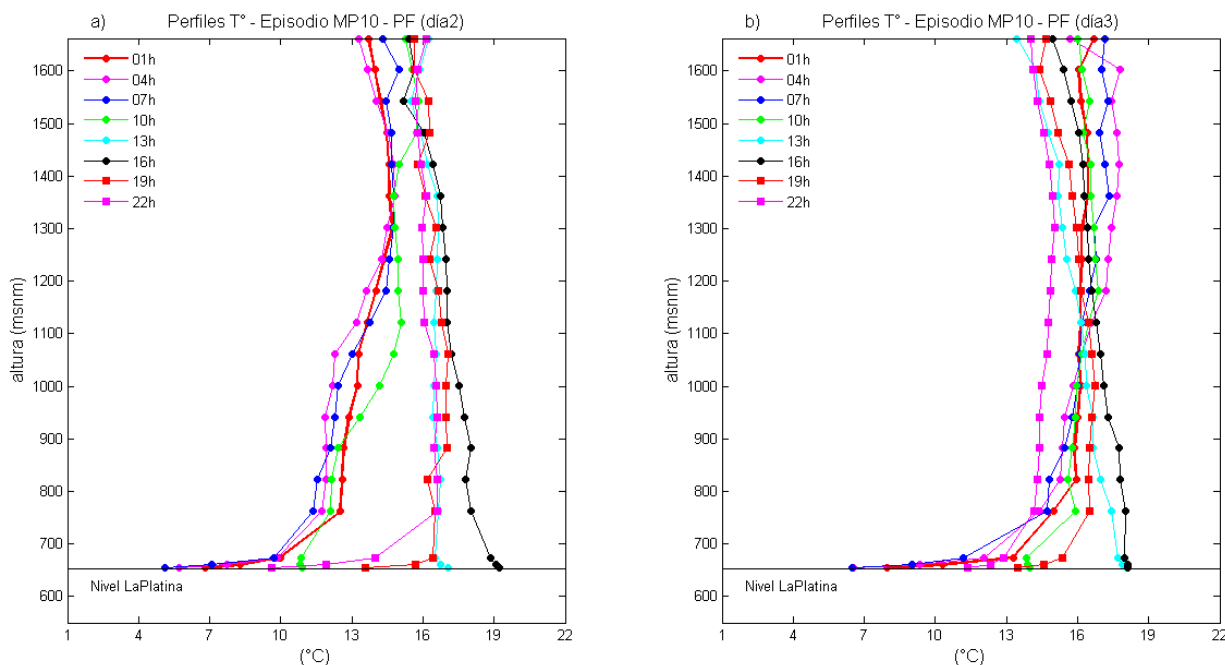


**Figura N°4.42.** Perfiles de temperatura en La Platina durante episodios críticos de MP10. a) Perfiles de temperatura durante el primer día de aumento de concentraciones en condiciones de D/Vc. b) Perfiles de temperatura durante el segundo día de aumento de concentraciones en condiciones de D/Vc.

En las figuras 4.43a y 4.43b se muestran los perfiles de temperatura para los días en que las máximas concentraciones horarias se asociaron a condiciones meteorológicas tipo PF. Se observa que el perfil de las 01 HL sobre los ~ 750 msnm, no es isotérmico como en el caso D/Vc, mostrando un calentamiento entre los ~ 1300 y 1500 msnm que alcanza cerca de ~14°C, mientras que a los 750 msnm registra unos ~ 2°C menos. En superficie la temperatura también es de unos ~ 5°C cerca de ~ 1°C mayor que en el caso D/Vc, a las 13 HL la atmósfera es prácticamente isotérmica en torno a 16°C. El perfil de las 16 HL muestra bien el máximo calentamiento diurno en superficie que en promedio alcanza ~ 19°C y cuyo efecto se percibe hasta los 1100 msnm. A las 19 HL se observa un enfriamiento bajo los ~ 1050 msnm, volviendo el perfil prácticamente isotérmico a igual que a las 13 HL e intensificándose a las 22 HL bajo los ~ 750 msnm debido al enfriamiento superficial. En la figura 4.43b se observa que para el día



tres, asociado en las secciones anteriores al máximo peak matinal de MP10, el perfil de las 01 HL muestra una tendencia isotermal sobre ~ 750 msnm, enfriamiento en superficie y un calentamiento sobre los 1100 msnm. El perfil de las 19 y 22 HL, indica finalmente el inicio de un proceso de enfriamiento del espesor.



**Figura N°4.43.** Perfiles de temperatura en La Platina durante episodios críticos de MP10. a) Perfiles de temperatura durante el primer día de aumento de concentraciones en condiciones de PF. b) Perfiles de temperatura durante el segundo día de aumento de concentraciones en condiciones de PF.

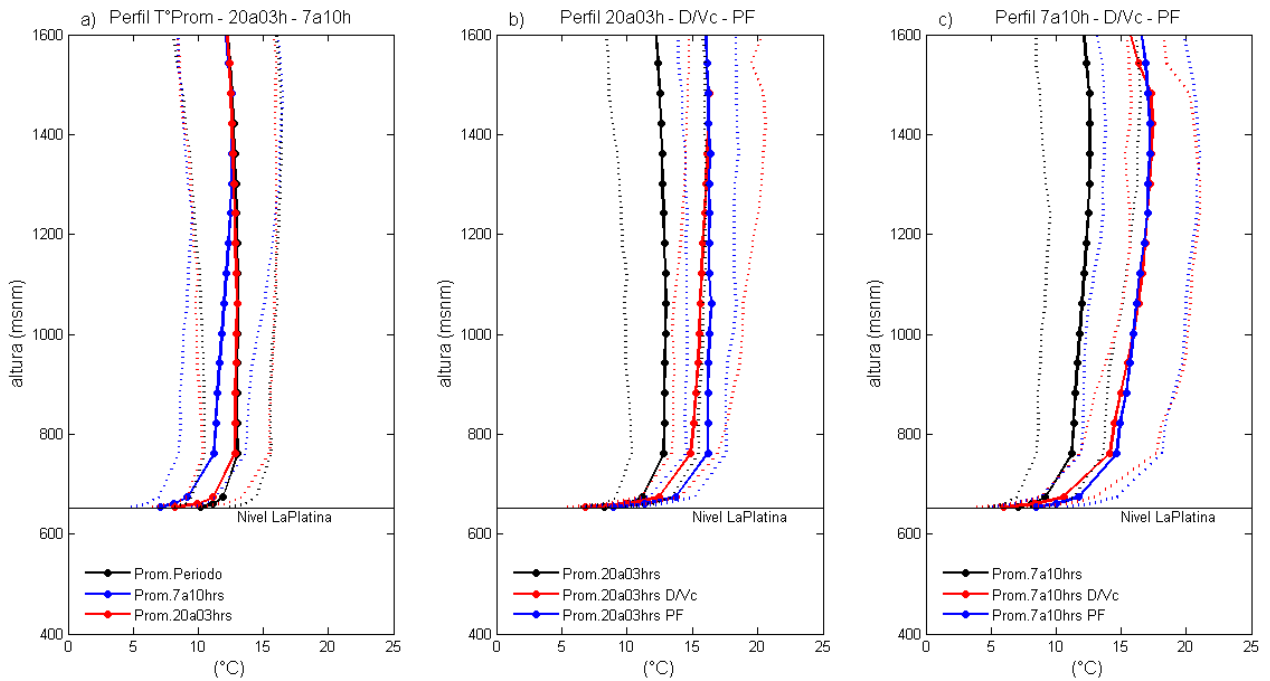
En la figura 4.44 se presenta una caracterización del perfil vertical promedio de temperatura para el periodo nocturno y para el final de la noche, de los casos asociados a condiciones meteorológicas tipificadas como D/Vc y PF. Se representa el periodo nocturno como el promedio entre 20 y 03 HL y el final de la noche como promedio entre las 07 y 10 HL.

En la figura 4.44a se muestran los perfiles promedio de todo el periodo frío y los perfiles promedio representativo del periodo nocturno y del final de la noche. Se observa que consistentemente con lo visto en las secciones previas, los tres perfiles muestran el efecto del enfriamiento superficial expresado como una inversión térmica. El perfil nocturno es bastante similar al perfil promedio del periodo, se observa una inversión térmica superficial hasta los 22 m (~ 674 msnm) y una inversión más suave entre los 22 y los 110 m (~ 762 msnm), y desde este nivel hacia arriba, una condición isotérmica (~ 13°C). El perfil representativo del final de la noche es más frío que el perfil promedio en el tramo inferior del espesor estudiado y en

superficie representado por una inversión superficial hasta los 22 m (~ 674 msnm) que suaviza su pendiente entre los 22 y 110 m (~762 msnm) y aumenta su temperatura progresivamente desde ~ 11°C a los 110 m (~762 msnm) hasta igualarse a ~ 13°C cerca de los 710 m (~ 1.360 msnm).

En la figura 4.44b se comparan el perfil promedio del periodo nocturno y los perfiles medios nocturnos de los casos donde se identifica configuraciones D/Vc y PF. Se observa que en ambos tipos de configuración meteorológica los perfiles sobre los 110 m (762 msnm) muestran un espesor más cálido (~ 2.5 a 3°C) que el perfil promedio. Para los perfiles de los casos D/Vc, la temperatura en superficie es ~ 1.4°C menor que el promedio, aumentando rápidamente hasta ser mayor que el promedio cerca de los 22m (674 msnm), dando cuenta de una fuerte inversión térmica superficial. Luego, la temperatura muestra una pendiente más suave entre los 22 y 110 m (762 msnm), y otra más suave aún, desde los 110 m hasta los 700 m (~ 1360 msnm) donde el perfil se vuelve isotérmico (~ 16°C). En el caso de los PF, la temperatura en superficie es cerca de ~ 0.6°C mayor que el promedio y muestra también una inversión térmica hasta los 22 m que se mantiene hasta cerca de los 110 m donde la temperatura es cerca de ~ 1.3°C más cálida que el perfil de D/Vc al mismo nivel, luego de este nivel el perfil se vuelve isotérmico.

En el perfil representativo para el final de la noche (figura 4.44c), la temperatura superficial es más baja en los casos D/Vc respecto a los PF. A partir de los 110 m los perfiles de ambos casos son prácticamente iguales y se incrementan progresivamente manteniendo una inversión térmica hasta cerca de los 830 m (~1480), donde se observa una inflexión en el perfil de temperatura a partir del cual la temperatura comienza a disminuir con la altura.

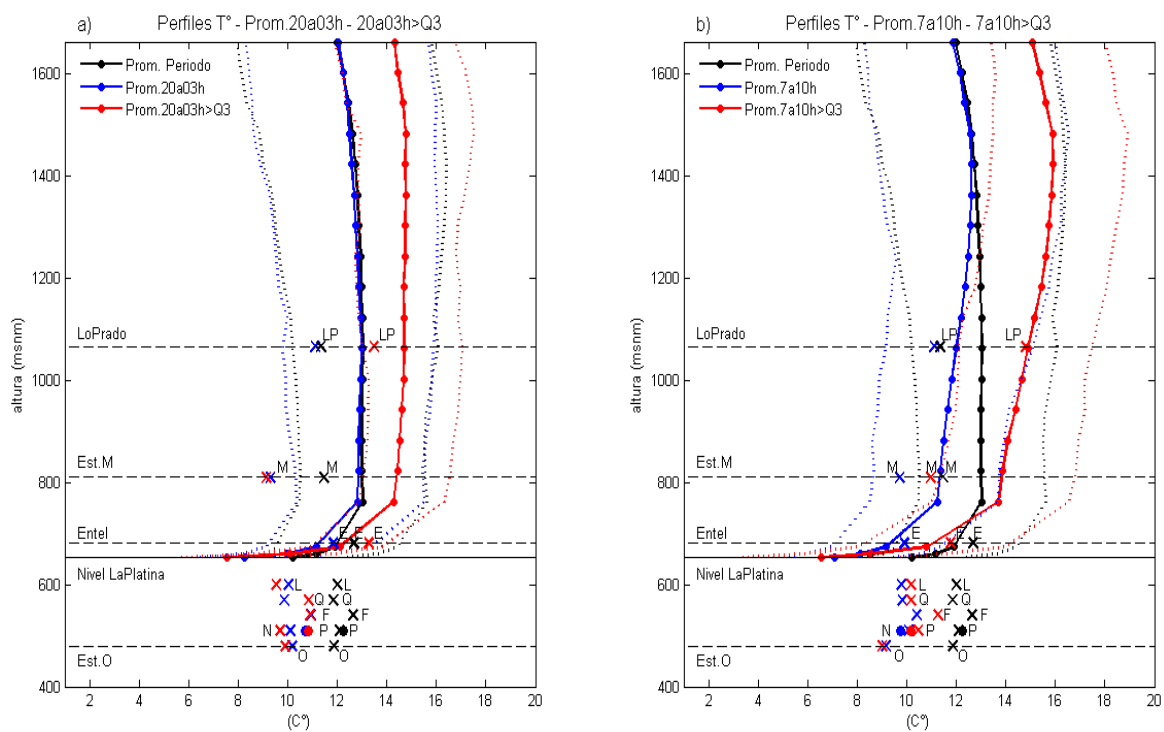


**Fig. N°4.44.** Perfiles verticales promedio de temperatura en la La Platina para el periodo frío. a) Perfil promedio del periodo frío y perfiles medios representativos del periodo nocturno (20a03 HL) y del final de la noche (07a10 HL). b) Perfil promedio para el periodo nocturno en condición sinóptica D/Vc y PF. c) Perfiles promedio del final de la noche en condición sinóptica D/Vc y PF.

#### 4.5.4.2. Perfiles verticales de temperatura según peak matinales y nocturnos de MP10

En la figura 4.45 se muestran los perfiles verticales medios de temperatura representativos para el periodo nocturno y para el final la noche de los días seleccionados con altas concentraciones de MP10. La figura 4.45a muestra que finalmente las noches en que se registran los peak de MP10, el espesor entre ~ 750 y ~1300 msnm se encuentra ~ 1.5°C más cálido, mientras que en superficie se observa un enfriamiento del orden de ~ 0.5°C respecto a la temperatura promedio del periodo nocturno. El perfil promedio de la mañana siguiente a los peak nocturnos se muestra en la figura 4.45b, donde se observa que también hay un calentamiento del espesor a partir del nivel de observación del LapRass (~ 750 msnm) y como se ha observado en todos los casos, el enfriamiento superficial es mayor al mostrado en el periodo nocturno que lo antecede. El perfil de temperatura ya no muestra tendencia isotérmica en los niveles superiores y, por el contrario, se incrementa progresivamente hasta un nivel cercano a los ~ 1500 msnm. Luego, la temperatura decrece en todos los casos, mostrando que en forma independiente al calentamiento generalizado observado durante la noche en el espesor, se alcanza un máximo al fin la noche sobre un nivel específico cercano a los 1000 m sobre la superficie. Mientras este

máximo se alcanza, la superficie responde al enfriamiento nocturno maximizando la estabilidad superficial.



**Fig. N°4.45.** Perfiles verticales promedio de temperatura para la La Platina durante el periodo frío. a) Perfil promedio representativo del periodo nocturno (20a03 HL) con altas concentraciones de MP10. b) Perfil promedio representativo del final de la noche (7a10 HL). Se han agregado también los valores medios de temperatura de las estaciones de Lo Prado (LP), Torre Entel (E) y de las estaciones de la Red MACAM; Independencia (F), La Florida (L), Las Condes (M), Parque O'Higgins (N), Pudahuel (O), Cerrillos (P) y El Bosque (Q).

A modo de referencia se compara con los perfiles verticales de temperatura, información de temperatura obtenida desde otras estaciones meteorológicas que operaron en la región durante el periodo de interés. Si bien las diferencias observadas en los valores medios pueden estar influenciadas por los lugares de emplazamiento, permiten mejorar la caracterización de las temperaturas en la cuenca. Por ejemplo, los valores de la estación Lo Prado ubicada en altura del orden de ~410 m respecto de La Platina y a unos 27 km de distancia, muestra que en el borde poniente de la cuenca la temperatura es generalmente ~ 1.6°C menor al promedio del periodo, lo que en parte podría atribuirse a la diferencia de las metodologías de medición. Esta estación responde en ambos casos al calentamiento detectado en el perfil de La Platina, manteniendo cierta diferencia en el periodo nocturno mientras que respecto del perfil para el

final de la noche, es prácticamente la misma. Lo anterior indica que el fenómeno que provoca el máximo calentamiento en la madrugada se manifiesta en todo el nivel superior de la cuenca.

Para los datos de la Torre Entel, en el centro de la ciudad (~ 80 m), se presentan una diferencia de sólo 7 m de altitud respecto al tercer nivel de observación de la Torre de La Platina (22 m sobre la superficie) por lo que podría dar un idea de la variación de temperatura entre el centro de la ciudad y el sector de La Platina. Se observa que la temperatura promedio de la Torre Entel es del orden de ~ 0.8°C mayor que el promedio nocturno. Sin embargo, se debe tener en cuenta que estos valores pueden estar influenciados por el efecto urbano.

Durante las noches de concentraciones altas, el perfil calculado en La Platina muestra un aumento de temperatura en todo el espesor comprendido entre los ~ 750 y 1500 msnm con un valor promedio del orden de ~14°C, mientras que para el final de la noche alcanza un máximo de temperatura del orden de ~16°C cerca de los 1500 msnm, lo que genera un perfil de inversión térmica en el espesor comprendido entre los 750 y dicho nivel superior. En superficie la temperatura disminuye en promedio unos ~ 0.5°C formando una inversión térmica superficial lo que es coherente con una respuesta al enfriamiento nocturno.

Los valores de temperatura superficial observados en las estaciones de la calidad del aire se muestran también para todos los casos, encontrando que en general el promedio para el periodo frío se mantiene en torno a los ~12°C +/- 0.6°C, lo que es coherente con una correlación alta entre las estaciones de la Red. En la estación O, cuyas concentraciones de MP10 fueron utilizadas como representativas de los episodios de contaminación observados, se tiene que el valor promedio nocturno es ~1°C menor que el promedio del periodo y más importante aún, mayor entre 2,5° y 2°C respecto a las temperaturas superficiales observadas en La Platina. Lo anterior, si bien muestra el efecto del enfriamiento nocturno, indica que existe una diferencia de intensidad de la estabilidad superficial entre ambas zonas, siendo en principio más estable La Platina.

Las temperaturas en estación La Florida (L), en la zona Suroriente y la estación de los Cerrillos (P) zona centro poniente, prácticamente no muestran cambios en sus valores medios para el periodo nocturno y para el final de la noche. La estación El Bosque (Q) en la zona Surponiente muestra un aumento del orden de ~1°C durante el periodo nocturno, mientras que la estación de Independencia (F) en la zona centro norte, responde con un aumento de temperatura los días con altas concentraciones, al final de la noche. La estación Parque O'Higgins en la zona

centro sur de la ciudad se enfría 0.5°C respecto al valor promedio nocturno para altas concentraciones y es 0.5°C más cálida al final de la noche de los días con altas concentraciones de MP10. La estación de Las Condes, ubicada a unos ~ 810 msnm, muestra que la temperatura promedio del periodo es cerca de ~ 1°C más frío respecto al valor del perfil promedio a ese mismo nivel, mientras que el promedio del periodo nocturno de días con altas concentraciones es ~ 3°C más frío. Respecto del promedio del final de la noche, la temperatura de la estación es en promedio unos ~ 1,5°C más fría que el valor promedio de todo el periodo, y unos ~ 3°C más fría que el promedio del final de la noche, mientras que para el final de la noche la temperatura se mantiene en torno al valor promedio del periodo, lo que se puede interpretar, considerando las posibles influencias superficiales, como un efecto de calentamiento generalizado de la atmósfera en dicho nivel.

#### 4.6. Análisis estadístico de la temperatura observadas en la vertical

Con el objeto establecer si los valores del perfil vertical promedio de temperatura asociado a los días con altas concentraciones de MP10, tanto en el periodo nocturno como al final de la noche, corresponden efectivamente a casos especiales, a continuación se evaluará la significancia estadística de la diferencia entre las temperaturas del perfil promedio de dichos casos respecto de las temperaturas del perfil promedio del periodo. Para esto, se desarrolló un experimento simple tipo Monte Carlo, a través del cual se generaron selecciones aleatorias de días de periodo frío del mismo tamaño que la muestra de casos especiales. En la tabla 4.2 se indican los niveles y los valores de temperaturas medias seleccionadas. Los cálculos se hacen para los datos de la Platina y LapRass y para la estación de Lo Prado.

**Tabla N° 4.2 Valores de Temperatura promedio para cada nivel seleccionado**

Nivel	Temperatura (C°) Prom. 07a10hrs	Temperatura (C°) Prom. 07a10hrs [MP10] > Q3	Temperatura (C°) Prom. 20a03hrs	Temperatura (C°) Prom. 20a03hrs [MP10] > Q3
2 m (662 msnm)	7.1	6.5	8.2	7.5
8 m (660 msnm)	8.1	8.5	10.0	10.1
22 m (674 msnm)	9.2	10.8	11.2	12.1
170 m (822 msnm)	11.4	13.9	12.9	14.4
290 m (942 msnm)	11.6	14.4	12.9	14.6
410 m (1062 msnm)	12.0	14.9	13.0	14.7
590 m (1242 msnm)	12.5	15.6	12.8	14.7
890 m (1542 msnm)	12.3	15.6	12.4	14.7
Lo Prado (1065 msnm)	11.1	14.5	11.1	13.5

Se hicieron 1.000 experimentos para generar una función de distribución empírica (CDF) de las diferencias de los valores medios para cada nivel seleccionado. En la tabla 4.3, se indican las diferencias para las cuales se asignó dicha significancia. Se muestra el valor del 95% de probabilidad como límite inferior de aceptación para la diferencia de temperatura observada en los días de altas concentraciones en dicha distribución.

Se observa que para el final de la noche la diferencia de las temperaturas promedio es significativa desde los 22m hacia niveles superiores, ya que la probabilidad de encontrar valores de diferencias entre los promedios calculados aleatoriamente y el promedio del periodo en cuestión queda fuera de la CDF. Para el periodo nocturno y del final de la noche entonces, las diferencias entre la temperatura promedio de los días contaminados y el promedio nocturno y para el final de la noche del periodo son significativas.

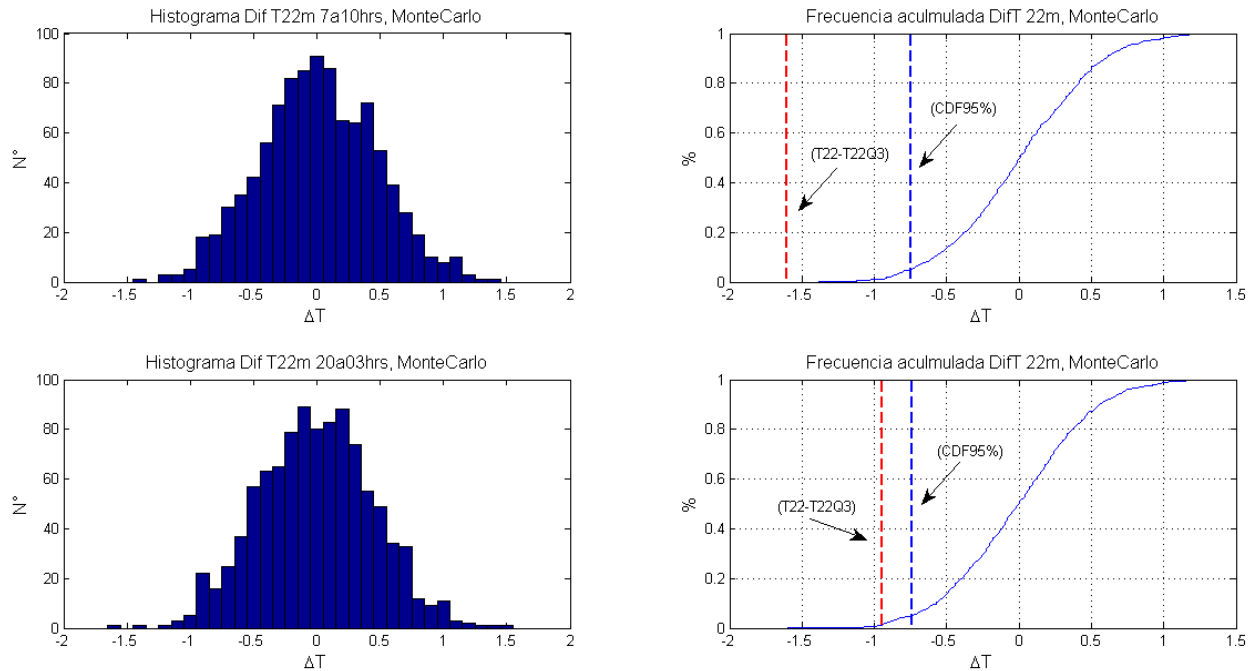
**Tabla N° 4.3 Diferencias de Temperatura por nivel y Percentil 95 para la curva de función de probabilidad empírica**

<b>Nivel</b>	<b><math>\Delta T(7a10)</math> Obs.</b>	<b>CDF(7a10) P95%</b>	<b><math>\Delta T(20a03)</math> Obs.</b>	<b>CDF(20a03) P95%.</b>
2 m (660 msnm)	0.5	-0.7	0.7	-0.6
8 m (660 msnm)	-0.4	-0.7	-0.1	-0,6
22 m (674 msnm)	-1.6	-0.7	-1.0	-0,7
170 m (822 msnm)	-2.5	-0.8	-1.6	-0,9
290 m (942 msnm)	-2.8	-0.5	-1.7	-0,8
410 m (1062 msnm)	-2.9	-0.9	-1.7	-1,0
590 m (1242 msnm)	-3.1	-1.1	-1.9	-1,1
890 m (1542 msnm)	-3.2	1.0	-2.3	-1,1
Lo Prado (1065 msnm)	-3.3	-1.1	-2.4	-1.1

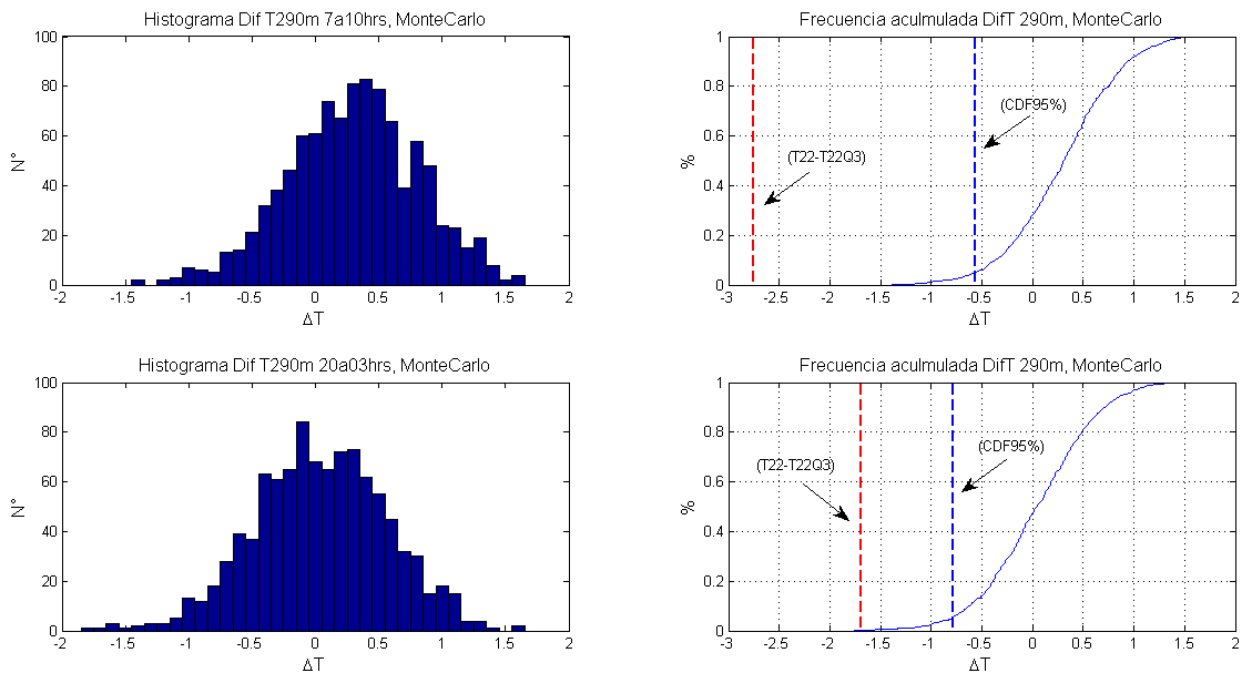
Fuente: Elaboración propia a partir de datos La Platina, LapRass y Lo Prado

Los valores observados para la estación de Lo Prado también muestran que las diferencias de temperatura presentan significancia estadística. A modo de ejemplo en las figuras 4.46, 4.47 y 4.48 se presenta la distribución de las diferencias calculadas en los experimentos tipo Monte Carlo y la función de distribución probabilidad empírica (CDF) para los niveles de 22 m, 290m y para la estación de Lo Prado (~ 400 m), a 1065 msnm. Se muestra un histograma de las diferencias de temperatura calculadas en el experimento las que se distribuyen normalmente y se muestra en las CDF el valor observado (línea roja segmentada) y el valor asociado a un 95% de probabilidad (línea azul segmentada). Los casos en que el valor observado está fuera de la

CDF, indica que la probabilidad de encontrar una diferencia de temperatura como la observada en los perfiles promedios de los días con altas concentraciones es baja, por lo tanto los valores medios del perfil vertical de temperatura representan un caso especial.

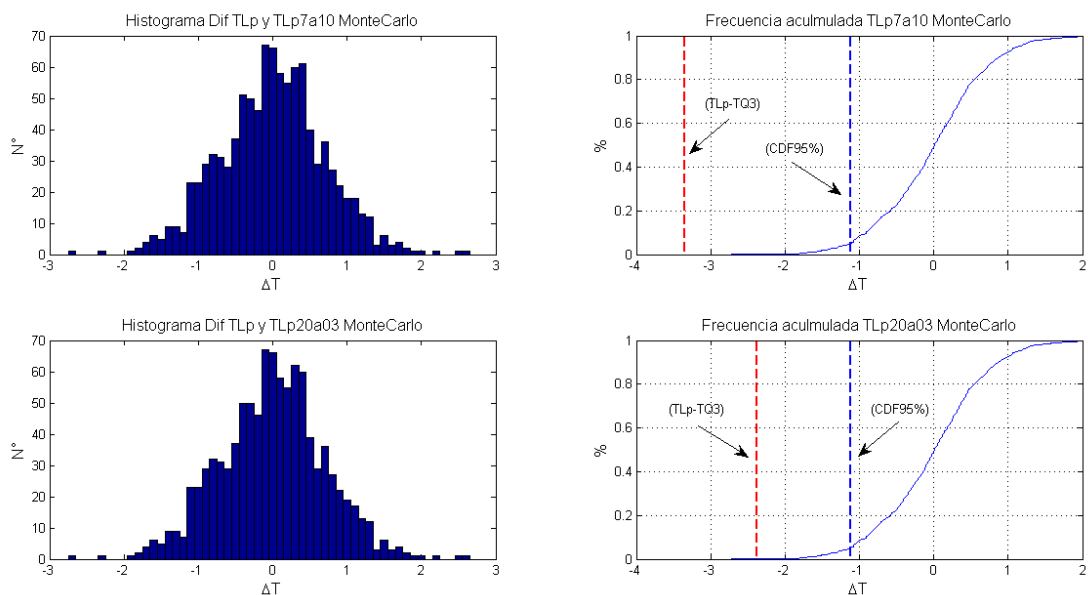


**Fig. N°4.46.** Histograma de diferencias de temperatura y Distribución de probabilidad empírica para las temperaturas del periodo nocturno y para el final de la noche en el nivel de 22m.



**Fig. N°4.47.** Histograma de diferencias de temperatura y Distribución de probabilidad empírica para las temperaturas para el periodo nocturno y para el final de la noche en el nivel de 290m.





**Fig. N°4.48.** Histograma de diferencias de temperatura y Distribución de probabilidad empírica para las temperaturas para el periodo nocturno y para el final de la noche para la estación Lo Prado.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

En el presente trabajo se realizó una caracterización de la estructura térmica de la atmósfera para la cuenca de Santiago y se estudió su relación con episodios de calidad del aire para Material Particulado MP10. Esta caracterización se realizó a partir de datos de temperatura del perfilador vertical LapRass y de la torre meteorológica de 24 m ubicada en la estación de La Platina durante el año 1999. Los datos de la torre y el perfilador mostraron ser útiles para representar perfiles verticales promedio de temperatura en los primeros 1000 m sobre la superficie regional para todo el año, especialmente en el periodo nocturno (20 a 03 HL) y al final de la noche (07 a 10 HL).

En función de los objetivos de este trabajo se presentan las siguientes conclusiones:

- **Caracterizar la estructura térmica vertical sobre Santiago a partir de las observaciones obtenidas desde el equipo LapRass y de la Torre de La Platina.**

La estructura térmica vertical sobre Santiago se caracteriza en su ciclo medio diario y anual por la presencia de una inversión térmica nocturna bien definida, que en el periodo frío inicia su formación en promedio a partir de las 18 HL intensificándose al amanecer entre las 07 y 08 HL, mientras que en el periodo cálido se inicia cerca de las 20 HL y se intensifica alrededor de las 06 HL, lo que obedece al cambio estacional del periodo nocturno y al efecto de enfriamiento superficial durante la noche. El rasgo más notorio del perfil promedio que representa el final de la noche, y que marca una diferencia entre los periodos frío y cálido, es el cambio del perfil promedio sobre los 100 m que para el periodo frío mantiene la inversión térmica nocturna hasta los ~ 450 m con una pendiente fuerte en los primeros 30 m y una pendiente más suave a partir de los 100 m, mientras que para el periodo cálido el perfil sobre dicho nivel se vuelve isotérmico. Lo anterior es coherente con anomalías de temperatura observadas en la columna vertical, que respecto de los promedios mensuales del periodo frío, muestran valores positivos al final de la noche ( $\sim 0,5^{\circ}\text{C}$ ) entre los 600 y 800 m y anomalías negativas ( $\sim -1^{\circ}\text{C}$ ) bajo los 200 m y cerca de los 1000 m entre los meses de junio y julio.

Respecto al efecto diurno, el calentamiento superficial modifica el perfil promedio de temperatura mostrando sus efectos hasta cerca de los 700 m en el periodo frío y hasta los 1000 m en el periodo cálido. En ambos casos la máxima expresión se observa en torno a las 16 HL, hora de la máxima temperatura. Durante las tardes del año estudiado, el nivel de 550 m parece ser un nivel de transición entre anomalías negativas y positivas respecto del ciclo anual. Para el periodo cálido, sobre los 550 m se observan anomalías negativas  $\sim -3^{\circ}\text{C}$  cerca de los 1000 m, mientras que bajo dicho nivel se observan anomalías positivas del orden de  $\sim 2,5$  y  $3^{\circ}\text{C}$  cerca de los 100 m.

La correlación interdiaria de la temperatura superficial promedio a 2 m en La Platina y los niveles superiores, para ambos periodos, muestra que el perfil nocturno y del final de la noche las temperaturas superficiales se presentan desacopladas de los niveles superiores especialmente al final de la noche, donde la correlación entre la temperatura de superficie y los niveles superiores es del orden de  $r \sim 0,5$  en los primeros 20 m y del orden de  $r \sim 0,2$  y  $0,1$  respecto de las temperaturas sobre los 200 m. Lo anterior se manifiesta principalmente entre los meses de marzo y junio. Para el perfil promedio de la tarde se observa en cambio una alta correlación ( $r \sim 0,8$  a  $0,9$ ) que en el periodo cálido alcanza hasta los 900 m, mientras que para

el periodo frío se mantiene alta ( $r \sim 0.9$ ) solo hasta los 300 m, disminuyendo a  $r \sim 0.7$  cerca de los 800 m. Lo anterior se puede atribuir a la diferencia de calentamiento diurno entre ambos periodos y por lo tanto a la efectividad de la mezcla e intercambio vertical asociada el efecto convectivo en la capa límite.

La comparación de temperaturas entre el perfil vertical y la estación Lo Prado ubicada en el borde poniente de la cuenca, mostró valores de la temperatura promedio para el periodo frío  $\sim 1.6^{\circ}\text{C}$  menor al promedio del perfil de temperatura al mismo nivel ( $\sim 590$  m), lo que en parte puede atribuirse a la diferencia de las metodologías de medición. No obstante, la estación responde a los aumentos de temperatura, mostrando diferencias en el periodo nocturno mientras que para el final de la noche es prácticamente la misma que la del perfil vertical de temperatura, lo que indica que el fenómeno que provoca incrementos de temperatura en la madrugada se manifiesta en todo el nivel superior de la cuenca. Para los datos de la Torre Entel, ubicada en el centro de la ciudad, se observa que la temperatura promedio es unos  $\sim 0.8^{\circ}\text{C}$  mayor que el promedio nocturno del perfil de la Platina lo que indica que el efecto urbano disminuye la intensidad de la estabilidad superficial. Las temperaturas medias observadas en las estaciones de calidad del aire durante el periodo frío son entre  $1,5$  y  $2^{\circ}\text{C}$  mayores a la temperatura superficial media observada en La Platina ( $\sim 10^{\circ}\text{C}$ ). Las temperaturas de esta estaciones presentan para periodo frío una alta correlación entre sí ( $r > 0.9$ ).

En la estación O, utilizada como representativa de los episodios de contaminación, la temperatura muestra un valor nocturno promedio  $\sim 1^{\circ}\text{C}$  menor que el promedio del periodo y, más importante aún, mayor entre  $2$  y  $2,5^{\circ}\text{C}$  respecto a las temperaturas superficiales observadas en La Platina. Lo anterior, si bien muestra el efecto del enfriamiento nocturno, indica que existe una diferencia de intensidad de la estabilidad superficial entre ambas zonas, siendo en principio más estable el sector de La Platina. Lo anterior, sin perder de vista al carácter urbano del emplazamiento de la estación de calidad del aire.

- **Establecer y cuantificar la relación entre perfiles de temperatura del LapRass y La Platina, con los datos de Material Particulado observados en la Red de Monitoreo oficial de la cuenca de Santiago.**

El análisis de las concentraciones de MP10 según las configuraciones sinópticas tipo D/Vc y PF muestra que durante el periodo frío ambos en casos se genera un incremento MP10, en

asociación a un proceso de calentamiento del espesor comprendido entre los 200 y los 800 m que alcanza en promedio  $\sim 3^{\circ}\text{C}$  durante la noche y  $\sim 4^{\circ}\text{C}$  al final de la noche. En ambos casos el máximo calentamiento se registra entre las horas que siguen después del peak nocturno ( $\sim 22$  y  $24$  HL) y antes del peak matinal ( $\sim 10$  HL). Se observó también en ambos casos que las concentraciones de MP10 muestran un aumento significativo caracterizado por un peak matinal moderado  $\sim 200$  y  $230$   $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ , seguido de un fuerte peak nocturno que alcanza los  $\sim 410$  a  $440$   $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ , seguido siempre de un peak matinal mayor al peak matinal del día anterior.

Bajo la condición D/Vc, antes de manifestarse el incremento significativo del MP10, la columna atmosférica es isotérmica entre los 100 y 300 m, mientras que en superficie se desarrolla la inversión nocturna. El calentamiento de altura muestra un máximo entre los  $\sim 600$  m y  $\sim 890$  m que se propaga hacia niveles inferiores hasta los  $\sim 300$  m generando un perfil térmico caracterizado por una inversión en altura entre los  $\sim 300$  m y  $\sim 890$  m, un espesor isotermal entre los 100 y 300 m y una inversión superficial. Bajo este escenario se genera un peak matinal moderado que disminuye durante el día hasta las horas de transición donde el espesor es nuevamente isotérmico, pero ahora desde los  $\sim 30$  m hasta cerca de los 800 m, dando paso al fuerte incremento de las concentraciones nocturnas de MP10 que finalmente caracterizan el episodio. Luego, un proceso de enfriamiento superficial resulta en una fuerte intensificación de la inversión nocturna al final de la noche bajo los 100 m, escenario donde se genera el máximo matinal de concentraciones de MP10 observado. Durante la condición PF, antes de las concentraciones significativas de MP10, el espesor nocturno muestra una inversión térmica entre los 100 y 700 m, y una inversión superficial más intensa que en la configuración D/Vc, lo que se puede atribuir a un proceso de calentamiento previo. El perfil evoluciona mostrando al final de la noche un perfil isotérmico en altura entre los  $\sim 530$  m y 1000 m, una inversión térmica entre los  $\sim 350$  y 530 m, y una inversión superficial que se intensifica progresivamente durante la noche. En este escenario, al igual que en la condición D/Vc, se genera el peak matinal previo, mientras que máximo peak nocturno, se asocia a una fuerte estabilización en los primeros 30 m, que se modera hasta cerca de los 150 m y a una condición isotérmica en el resto del espesor.

En promedio la condición PF genera un incremento global de temperatura unas 24 hrs antes de la ocurrencia del fuerte peak nocturno, mientras que en el caso del episodio tipo D/Vc el aumento global se inicia en la mañana del mismo día de del peak nocturno. La finalización de ambos tipos de episodios también cambia, observándose la culminación del PF de forma abrupta respecto de los episodios tipo D/Vc, lo anterior debido a las características propias de la forzante sinóptica tipo PF.

El análisis de los promedios condicionados de temperatura refuerza lo observado para las configuraciones sinópticas señaladas y que se han asociado a los episodios de contaminación. De este modo, durante las noches y mañanas de altas concentraciones de MP10, la atmósfera sobre Santiago responde a un calentamiento previo que según el perfil promedio de temperatura se genera sobre los 600 m y que luego propaga hasta un nivel cercano a los ~ 400 m. Bajo esta condición, después del periodo diurno el espesor atmosférico estará unos 4°C más cálido que las condiciones promedio del periodo. Esto se traduce en una fuerte estratificación entre superficie y poco más de 100 m, lo que coincide con el peak nocturno, el que una vez alcanzado comienza a decaer paulatinamente durante la noche hasta la madrugada, momento en que la estratificación alcanza los 400 m. Simultáneamente, sobre los ~ 600 m se manifiesta el máximo calentamiento (anomalías positivas) mientras que en superficie un máximo enfriamiento (anomalías negativas). Lo anterior es consistente con la observación de inversiones térmicas de subsidencia sobre la cuenca en el caso de D/Vc, que se han asociado a flujos del Este que intensifican la estabilidad general de cuenca y que en ocasiones cerca del amanecer fusionarían la inversión térmica de altura con la inversión superficial. En el caso PF también se observan las condiciones de calentamiento en altura que en se han asociado también a la generación de un flujo descendente del Este.

- **Identificar las posibles relaciones existentes entre la estabilidad superficial y en distintos niveles de la columna atmosférica, y las condiciones meteorológicas observadas durante la ocurrencia de episodios críticos de contaminación.**

La estabilidad superficial representada por  $\Delta T_{8-2}$  al final de la noche presenta la mayor variabilidad mensual y diferencias de temperatura de hasta ~ 5°C en el espesor durante el periodo frío. Se concentra en el periodo nocturno en asociación al desarrollo de una inversión térmica radiativa que se forma rápidamente después de las horas de transición de la tarde-noche y que se intensifica en la madrugada. En la tarde los valores de  $\Delta T_{8-2}$  son negativos con baja variabilidad mensual y un marcado ciclo diario, consistente con el calentamiento superficial y el desarrollo de la capa de mezcla. En niveles superiores  $\Delta T_{170-22}$  y  $\Delta T_{530-170}$  se mantiene estable durante todo el día, con valores máximos en la mañana y cercanos a una condición neutra después del mediodía. En el nivel  $\Delta T_{950-530}$  ya no se observa una diferencia entre el periodo frío y cálido, la capa de inversión es débil predominando una condición isotérmica

durante la mañana. En este nivel el efecto superficial es prácticamente nulo y la estabilidad del periodo diurno se acerca a una condición de tipo neutra.

Un análisis de la correlación entre la estabilidad superficial  $\Delta T_{8-2}$  y la estabilidad del espesor inferior de los datos obtenidos con el perfilador  $\Delta T_{530-170}$  al final de la noche, muestra una baja correlación. Sin embargo, al considerar la correlación de la estabilidad de la cuenca representada por  $\Delta T_{410-8}$ , y la estabilidad superficial  $\Delta T_{8-2}$  para el final de la noche, muestra que la estabilidad superficial se asocia bien a la estabilidad general del espesor. Lo que indica que la estabilidad superficial mantiene un ciclo diario independiente hasta que interactúa con un espesor estable de mayor altura que se propaga a niveles inferiores generando un efecto de la estabilidad global o acoplado en la cuenca.

Durante los eventos sinópticos tipo D/Vc y PF, la estabilidad superficial  $\Delta T_{8-2}$  se incrementa entre la noche del peak máximo y el amanecer previo al peak matinal, con un valor del orden de  $\sim 3.5^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . En el caso D/Vc la estabilidad superficial se mantiene mayor a los valores medios dos días después de la noche del peak máximo, mientras que para la condición PF muestra una disminución al día siguiente debido a la rápida variación de las condiciones meteorológicas.

El análisis de los promedios condicionados se ratifica la importancia del ciclo diario de la estabilidad superficial en la ocurrencia de los episodios de contaminación. Los datos muestran que la estabilidad superficial se incrementa cerca de un 20% durante la noche previa al peak nocturno, lo que es consistente con el incremento global de concentraciones de MP10 sobre los valores medios. A partir de las 18 HL de la noche del peak nocturno de MP10 la estabilidad superficial aumenta un 30% respecto al promedio y un 35% después de la medianoche manteniéndose en este rango hasta el final de la noche. En este escenario se desarrolla el peak matinal que luego disminuye durante el periodo diurno para aumentar nuevamente después de la transición tarde-noche. Mientras esto ocurre la estabilidad se ha incrementado entre un 10% y 20% respecto al promedio. El nuevo peak nocturno es menor a peak de la noche previa. Los niveles superiores muestran que el aumento de estabilidad sobre los valores típicos se observa solo durante la noche del máximo, estando los valores de estabilidad, antes y después del incremento significativo de MP10, en el rango de los valores típicos.

Es de interés observar que las temperaturas superficiales promedio observadas en las estaciones de calidad del aire son mayores a la temperatura media observada en la torre La

Platina, lo que se traduce en un cambio de la pendiente de perfil vertical de temperatura que resulta en una disminución en la intensidad de la estabilidad superficial. Lo anterior debido probablemente al efecto urbano de las estaciones y su ubicación en niveles inferiores al sector de La Platina. Esto indica que la estabilidad superficial mostraría variaciones de intensidad según la ubicación geográfica de las estaciones.

El análisis de la significancia estadística de las diferencias de temperaturas observadas en los perfiles característicos de periodos matinales y nocturnos con altas concentraciones y los perfiles promedio del periodo frío, indicó que para el final de la noche la diferencia de temperatura es significativa desde los 22 m hacia niveles superiores, mientras que para el periodo nocturno, las diferencias de temperatura son significativas desde los 8m hacia niveles superiores. Las pruebas realizadas en varios niveles muestra que para el periodo de observación, la probabilidad de encontrar una diferencia de temperatura como la observada entre los perfiles medios y los perfiles de los días con altas concentraciones es baja, por lo tanto, dicha diferencia representa efectivamente casos especiales.

## 5.2. Recomendaciones

El diagnóstico de la calidad del aire requiere estudiar la relación entre las concentraciones de contaminantes y los fenómenos meteorológicos de escala regional y local que las modulan. De lo anterior, es de particular interés la caracterización de la estabilidad superficial, actividad que implica un esfuerzo en observaciones meteorológicas en las zonas de interés. En este contexto, y en el marco del presente trabajo se consideran oportunas las siguientes sugerencias:

- **Análisis de perfiles verticales de viento:** Es de interés complementar los resultados de este trabajo con un análisis pormenorizado de los perfiles verticales de viento observada con el equipo LapRass durante el periodo 1999 y su relación con las concentraciones de MP10. Lo anterior permitirá realizar nuevas evaluaciones, por ejemplo, de la información obtenida desde el perfilador LapRass, y su relación con fenómenos de alta estabilidad. La información de este equipo en Santiago, sigue siendo la única en su tipo. Se sugiere como punto de partida una revisión de informes de seguimiento de episodios del periodo para el año 1999 elaboradas para CONAMA por el CENMA.

- **Estabilidad superficial:** Es recomendable caracterizar la estabilidad superficial a través de observaciones de temperatura en las primeras decenas de metros (~ 20, 30 o 40 m). Es recomendable generar información actualizada y analizar la información de radiosondeos levantada por ejemplo en las campañas de invierno que el MMA y la DMC han venido desarrollando en el periodo frío (abril - agosto) desde el año 2009 a la fecha, a partir de los radiosondeos efectuados desde la estación de la Quinta Normal. Cabe mencionar que durante el desarrollo de este trabajo (2013), se instaló una torre micro-meteorológica de 30 m en la zona poniente a menos de un kilómetro de la estación de calidad del aire Pudahuel (O) usada en este trabajo. Esta torre incorpora el registro continuo de temperatura a 3 niveles lo que permite la confección de un perfil superficial además de observaciones de viento convencional a 10 m y anemómetros ultrasónicos a 10 y 30 metros.
- **Análisis de MP10 vs PM2,5 y su relación con la estabilidad superficial:** Como se indicó en capítulos precedentes, la contaminación atmosférica en la ciudad de Santiago es todavía un problema por resolver, las condiciones de ventilación la ciudad sumado al crecimiento sostenido de las zonas urbanas y la expansión del parque vehicular, por ejemplo, generan una persistencia en la emisión de contaminantes y la ocurrencia de episodios de contaminación, tanto para el Material Particulado respirable (MP10) como para el Material Particulado fino (MP2,5), siendo este último contaminante desde el 2012, el desafío de la descontaminación urbana a nivel nacional.
- **Pronósticos operacionales con modelos numéricos de MP10 y MP2,5:** El desarrollo de pronósticos de calidad del aire a través de modelos numéricos para pronóstico operacional está en pleno proceso de desarrollo. La aplicación de la norma de calidad del aire para MP2,5 ha puesto de manifiesto la ocurrencia durante el periodo 2014 de intensos episodios críticos por MP2,5 desde las regiones VI a la región de Aysén, lo anterior durante el periodo frío. Lo anterior se tradujo en la implementación de Alertas Sanitarias en más de 9 ciudades de la zona centro Sur y Sur del País. Esto ha generado la necesidad de abordar el control preventivo de la exposición de la población a las altas concentraciones de contaminantes. Sin embargo, a la fecha y por diversos motivos, no se cuenta con pronósticos numéricos operacionales de calidad del aire para MP2,5. Lo anterior impone la necesidad de continuar con el esfuerzo de mejorar la caracterización de los fenómenos meteorológicos que modulan estos episodios, donde el estudio de la estabilidad superficial y del comportamiento de otras variables meteorológicas no se han desarrollado en forma sistemática.



- Monitoreo operacional de la estabilidad superficial:** El estudio de la estabilidad requiere del seguimiento adecuado de las variables meteorológicas que permitan la caracterización, por ejemplo, del perfil vertical de temperatura. En este contexto se puede pensar que la adquisición de un perfilador vertical de viento y temperatura como el LapRass sería lo apropiado, sin embargo, en la práctica se ha demostrado que la adquisición de dicho equipamiento no ha sido priorizada debido principalmente a los costos que este tipo tecnología de medición tiene. Sin dejar de lado el hecho de que a 15 años de la utilización del LapRass en Santiago los avances tecnológicos hacen que actualmente estos equipos sean más amigables y mucho más versátiles en su operación. La adquisición de un perfilador con las características generales del Lap3000 + Rass a la fecha, tiene un costo del orden de los ~ US\$ 465.000.- (contacto personal distribuidor en Chile marca SCintec actual proveedor del equipo Lap3000 con opción Rass).

La instalación de torres meteorológicas en otras cuencas o ciudades del país es razonable considerando que en general solo la Región Metropolitana cuenta con una red Meteorológica orientada a la calidad del aire. Estas torres de 30 ó 40 m se pueden complementar con estaciones meteorológicas convencionales con torres o mástiles de 10 m de altura. En el cuadro adjunto se entrega un resumen de las características de la torre micro-meteorológica recientemente instalada en la zona poniente de la Región Metropolitana:

**Cuadro N° 5.1 Instrumental base para Torre 30 metros (MMA-DMC)**

<b>Instrumental Torre</b>	<b>Unidades</b>
Temperatura y Humedad Relativa (hmp155a-L11)	3 unidades
Panel protector (41005-5) R. M. Young	3 unidades
Cm206 Brazo cruzado 1.8 m (6 ft) Campbell	2 unidades
Piranómetro CMP3 (radiación solar global) Campbell	1 unidad
Anemómetro Ultra-Sonico (3D) 18000 Young	2 unidades
Anemómetro convencional Model 05103L Young	1 unidad
Barómetro CS106 Vaisala	1 unidad
Datalogger (CR1000 y CR3000 + Caja protección) Campbell	2 unidades
Fuente con caja y cargador (PS24-SC-TM)	1 unidad
Fuente de poder 220V-50 (14014 - EUC)	1 unidad
Panel Solar 20W (SP20)	3 unidades
Modem GPRS (RavenXTG)	1 unidad
Interface a Red Ethernet (NL115)	1 unidad

Tarjeta Memoria 2 Gb (CFMC2G)	1 unidad
Torre Aluminio 30m (HD8-100) + Base Torre (B30)	1 unidad
Baliza roja (panel propio)	1 unidad
<b>Total costo en Moneda Nacional:</b>	
- Impuestos incluidos	<b>~ M\$ 36.000.-</b>

Fuente: Convenio Ministerio Medio Ambiente – Dirección Meteorológica de Chile

(Ver <http://www.mma.gob.cl/1304/w3-propertyvalue-16549.html>)

Otra opción es el desarrollo de campañas de monitoreo meteorológico con globo cautivo el que puede ser desplegado hasta 1000 m con 5 puntos de medición ó 500 m con 2 puntos de observación. Estos sistemas están diseñados para operar con un globo inflado con helio y con velocidades del viento de hasta 10 m/s (a mayor velocidad del viento se deberá considerar huinches y globos con mayor resistencia). Una descripción general y los costos asociados a la adquisición de este tipo de equipamiento, se indica en el cuadro adjunto:

#### Cuadro 5.2 Sistema de observación en altura con Globo Cautivo marca Anasphere

<http://www.anasphere.com>

<b>1. FLIGHT MOD: Smart Tether TM Flight Module, p/n ST6.0M</b> Módulos y funciones: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Transmisor con registro de datos cada 1 seg.</li> <li>- Medición de parámetros meteorológicos</li> <li>- Presión, Temperatura, Humedad Relativa</li> <li>- Velocidad y Dirección del Viento</li> </ul>	a) 5 unidades b) 2 unidades
<b>2. GROUND ST: SmartTetherTM Ground Station, p/n ST3.0G</b> - Software para visualización y almacenamiento de datos.	- -
<b>3. HARD CASE:</b> - Caja de transporte para ground station.	a) 2 unidades b) 1 unidad
<b>4. HUINCH: Winch electric</b> - Huinche eléctrico con línea de 1500 m. (300 lb) Spectra.	1 unidad
<b>5. GLOBO:</b> <b>a) Globo 21-ft, p/n ST3.0B-21</b> - (Hasta 5 módulos como máximo) <b>b) Globo, 15-ft, p/n ST3.0B-21</b> - (Hasta 3 módulos como máximo)	1 unidad (según de altura)
<b>6. TRAIN: Train Site Santiago</b> - Experto Anasphere	2 días
<b>Costo Total en Moneda Nacional:</b> Incluyendo Seguros, Transporte e Impuesto en Chile al mes de abril de 2014.	a) ~ <b>M\$ 74.500</b> b) ~ <b>M\$ 42.000</b>

Fuente: Comunicación personal con representantes en Chile

## 6. Bibliografía

- Alcañuz, R., (2007), Intrusión de estratos a la cuenca de Santiago: un estudio de sensibilidad usando el modelo MM5. Tesis de Magíster en Meteorología y Climatología. Universidad de Chile.
- Boletín Climático 1999, Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, con el auspicio y colaboración de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).
- Carrasco J. y Quintana J. (2004), Descripción de las condiciones atmosféricas observadas en Chile durante 1997-2000 asociadas a El Niño-La Niña, Oscilación del Sur. CONA.
- CENMA (1997), Pronósticos de Episodios de Contaminación Atmosférica, Programa Prioritario N°1. Anexo Campañas de mediciones de perfiles verticales de viento y temperatura mediante radiosondeos efectuadas durante 1997 (Informe final desarrollado para la Comisión Nacional del Medio Ambiente Región Metropolitana).
- CENMA (1998), Reporte Informe final y anexo de mediciones equipo de perfiles verticales LAP3000-RASS. Preparado para la Comisión Nacional del Medio Ambiente Región Metropolitana.
- DGF – U de Chile (1997), Comparación de Observaciones de Temperatura y Viento por radiosondeos y detectores remotos del CENMA: Radian Vertical Profiler Lap3000 y Remtech Acoustic Sounder PA2, Informe Final.
- D.S. N°59/1998, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República. Establece norma de calidad primaria para material particulado respirable MP10, en especial de los valores que definen situaciones de emergencia.
- D.S. N°66/2009, Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República. Revisa, reformula y actualiza Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana (PPDA).
- EPA (2000), Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications.

- Fuenzalida, H., (1971), *Climatología de Chile*, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, 90 pp. Santiago, Chile.
- Garratt, J. R., (1992): *The Atmospheric Boundary Layer*. Cambridge University Press.
- Garreaud, R. D., (1995), Regional atmospheric configurations during major storms in central Chile (in Spanish). *Meteorológica*, 19, 73–81.
- Garreaud, R., Rutllant J. and H. Fuenzalida, (2002), Coastal lows in north-central Chile: Mean structure and evolution. *Mon. Wea. Rev.*, 130, 75-88.
- Garreaud, R. D., y Rutllant J., (2004), Factores meteorológicos de la contaminación atmosférica en Santiago. Capítulo 2 en *Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica en Santiago*. R. Morales y C. González, Eds. Colección de Química Ambiental, Universidad de Chile. Pp. 9-36.
- Jorquera, H., (2002), Air quality at Santiago, Chile: A box modeling approach. I. Carbon monoxide, nitrogen oxides and sulfur dioxide. *Atmos. Environ.*, 36, 315–330.
- Minvu Seremi RM (2005), *Informe Análisis y Diagnóstico del Plan Regulador de Desarrollo Urbano de la Región Metropolitana de Santiago*, Secretaría Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo.
- Montecinos A. & Aceituno P., (2003), Seasonality of the ENSO-Related Rainfall Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies. *Journal Of Climate*, 16, 281-296.
- Muñoz R., et al (2003), *Meteorología y Modelación de la Calidad del Aire en la Región Metropolitana*, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile.
- Muñoz R., et al (2007), “Capítulo III. Diagnóstico Operacional y Recomendaciones Ámbito Meteorología”, desarrollado por el Departamento de Geofísica, Universidad de Chile en el estudio “Evaluación y propuesta de rediseño para la red de monitoreo automático de calidad del aire de la Región Metropolitana Red MACAM-2”.

- Muñoz R. & Alcañuz R. (2011), Mediciones con Lidar - DMC en Santiago: Resultados preliminares y recomendaciones, Depto. Geofísica, Universidad de Chile & Dirección Meteorológica de Chile 2011.
- Muñoz R. & Alcañuz R. (2012), Variability of Urban Aerosols over Santiago, Chile: Comparison of Surface MP10 Concentrations and Remote Sensing with Ceilometer and Lidar. *Aerosol and Air Quality Research*, 12: 8 - 19.
- Muñoz, R., (2012), Relative Roles of Emissions and Meteorology in the Diurnal Pattern of Urban Particulate Matter: Analysis of the Daylight Saving Time Effect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 62(6):642 – 650.
- Muñoz, R. & Corral, M. (2011). Comparación de la estructura vertical de la atmósfera sobre Santiago y Santo Domingo: resultados Preliminares, 2nd Congreso de Oceanografía Física Meteorología y Climatología del Pacífico Suroriental, La Serena, Chile, 5–7 Octubre, 2011.
- Muñoz R. & Schmitz, R. (2007), Morning peak of air pollutant concentrations in urban areas: effect of time lag between emissions and turbulence. Poster Session P2, Seventh Symposium on the Urban Environment (San Diego, CA).
- Muñoz R. & 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.
- Rogers R. R., and M. K. Yau (1989), *A Short Course in Cloud Physics*. 3rd Ed. Pergamon Press, Oxford, 293 pp.
- Rubio M., Cakmak S. & R. Edgar Dales (Usach 2011), Estudio Desarrollo e implementación de un indicador de seguimiento de la calidad del aire y su impacto en la población en la Región Metropolitana de Santiago. Informe Final, desarrollado para la Secretaría Regional Ministerial de Medio Ambiente de la Región Metropolitana de Santiago.
- Rutllant J., (1979), Meteorología de mesoescala en problemas de contaminación atmosférica urbana. Comparación entre condiciones potenciales de Santiago y Concepción. *Revista Tralka Vol.1 N°1*.

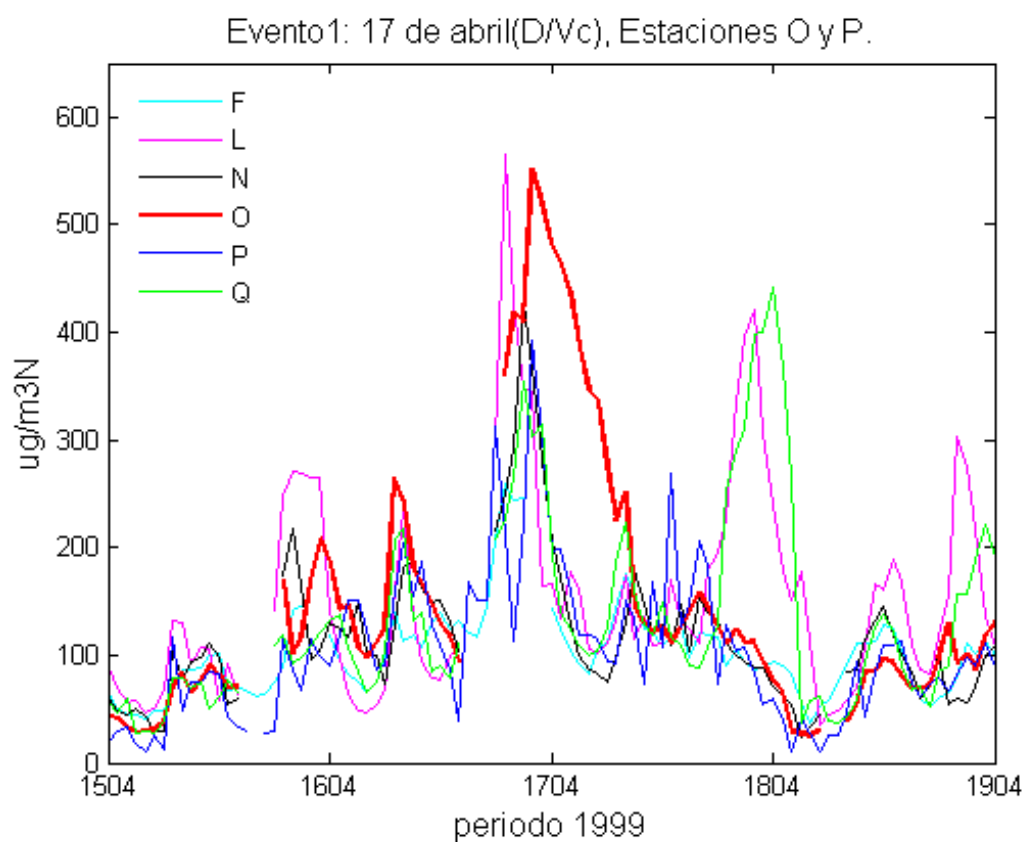
- Rutllant, Garreaud & Aceituno, (1992), “Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica en Santiago de Chile: Hacia la predicción de Episodios”. Trabajo presentado al I congreso Iberoamericano de Meteorología, Madrid, España.
- Rutllant J. and Garreaud R., (1995), Meteorological air pollution potential for Santiago, Chile: towards an objective episode forecasting. *Environ. Mon. and Assess.*, 34, 223–244.
- Rutllant J. y Garreaud R., 2004. “Episodes of Strong Flow down the Western Slope of the Subtropical Andes”, *Monthly Weather Review*, Vol 32, issue 2, p. 611.
- Schmitz R., & Falvey M., (2007). “Evaluación de los Modelos de Pronóstico de MP10 actualmente en Uso en la Región Metropolitana”. Documento Final preparado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, para la Comisión Nacional del Medio Ambiente.
- Stull R. D., (1999), *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers.
- Ulriksen P., (1981), Variaciones diarias de la altura de la capa atmosférica superficial de mezcla sobre Santiago, *Tralka Vol 1 N°(2): 143-151*.
- Ulriksen P., (1993), Factores Meteorológicos de la Contaminación Atmosférica de Santiago, Capítulo de Sandoval, H: Préndez, M. y Ulriksen P: (Eds) *Contaminación Atmosférica de Santiago: Estado Actual y Soluciones*. Santiago, Universidad de Chile y Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana. pp 37-60.
- Undurraga, A., (2009), *Desarrollo de Capa de Mezcla en Santiago: Análisis observacional y comparación con modelo de mesoescala*. Tesis de Grado programa de Magister en Meteorología y Climatología, Universidad de Chile, 89 pp.
- Universidad de Concepción (2002), Estudio “Caracterización de Aerosoles Secundarios Inorgánicos en la Estación Pudahuel de la Red Macam-2 y Tareas Asociadas de Aseguramiento de Calidad” desarrollado para la Comisión Nacional del Medio Ambiente Región Metropolitana.

- Usach (2006). Análisis Retrospectivo de Filtros de Material Particulado MP10 en sus fracciones fina y gruesa para estaciones de la Red Macam II en el período 2003-2006. Estudio desarrollado por el Departamento de Física de la Universidad de Santiago para la Comisión Nacional del Medio Ambiente Región Metropolitana.
- Wallace, J. y Hobbs. P, 2006: Atmospheric Science: An Introductory Survey,. 2nd ed. Elsevier. 483 pp.
- Whiteman C., 1990, Observations of thermally developed wind systems in mountainous terrain. Atmospheric Processes over Complex Terrain, Meteor. Monogr., Amer. Meteor. Soc., 23, 5 - 42.
- Vaisala (2005), User's Guide, Wind-Profilers Lap-3000.

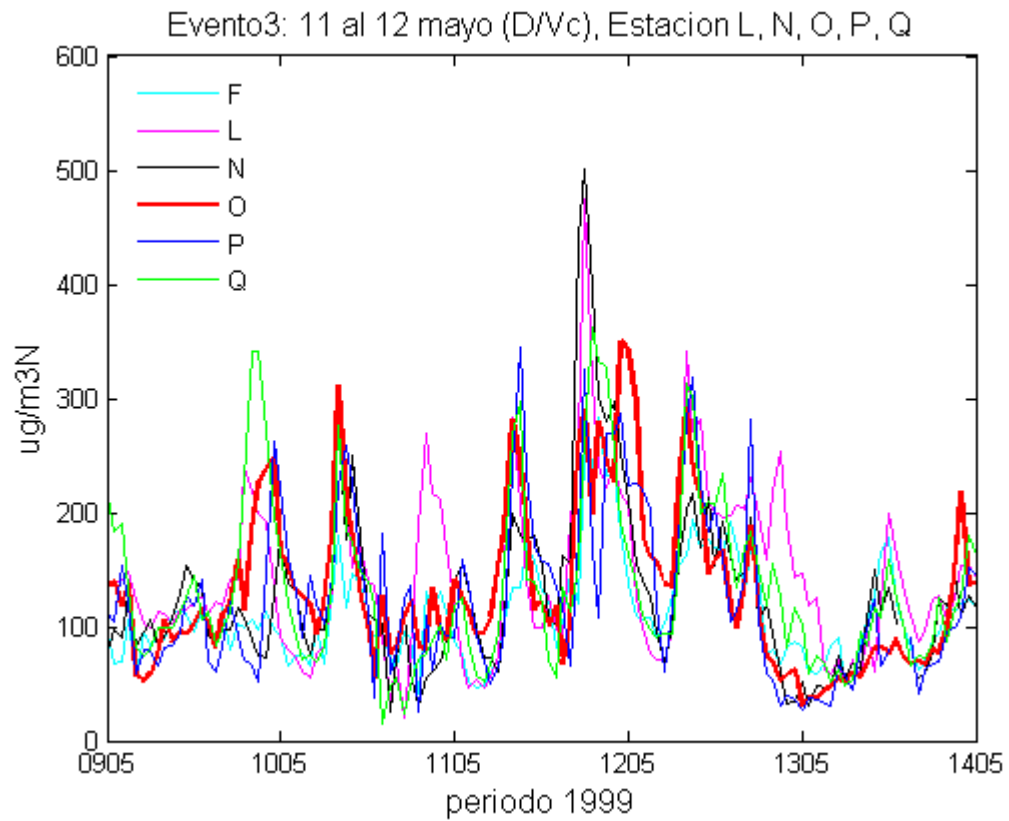
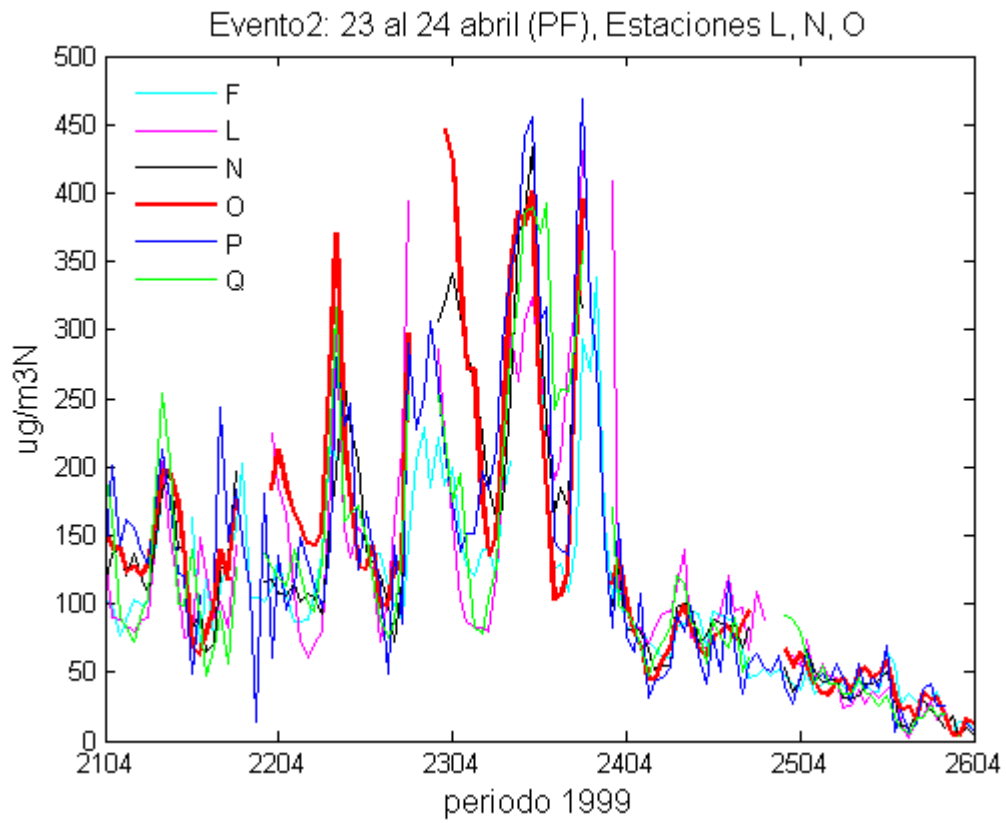
## 7. Anexos

### Anexo 1: Episodios de contaminación por MP10 periodo 1999

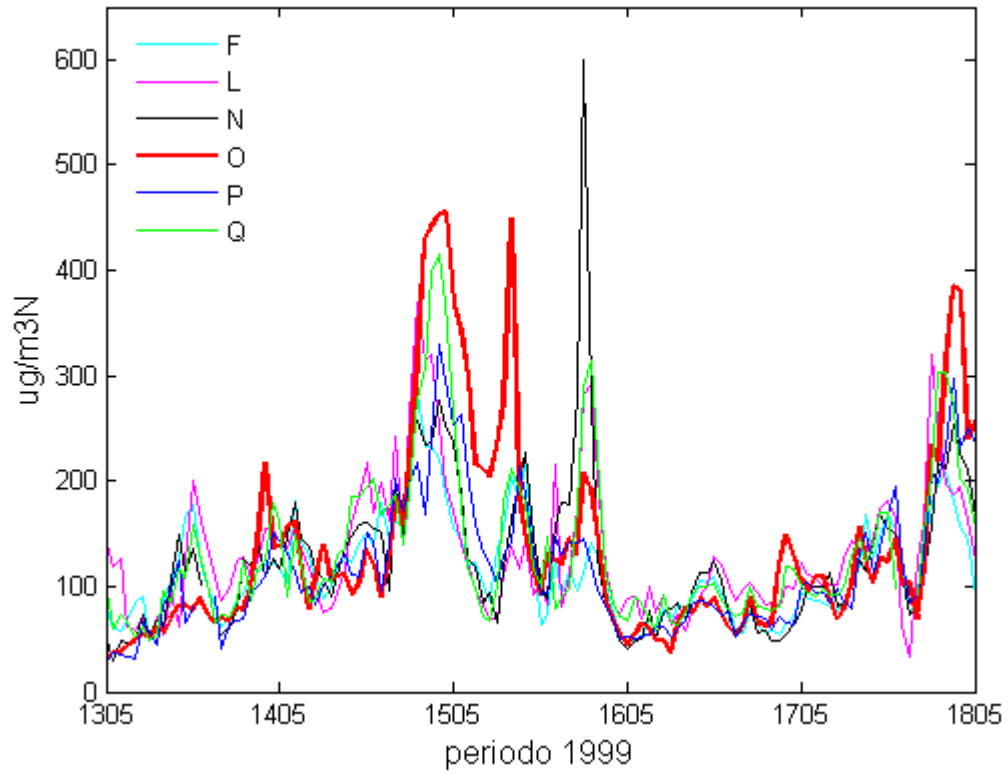
En las figuras adjuntas se muestran los ciclos diarios de los días de altas concentraciones de MP10 que dieron origen a los episodios críticos observados durante el periodo frío (abril – agosto) de 1999. Las estaciones de la red de calidad del aire F, L, N, O, P y Q.



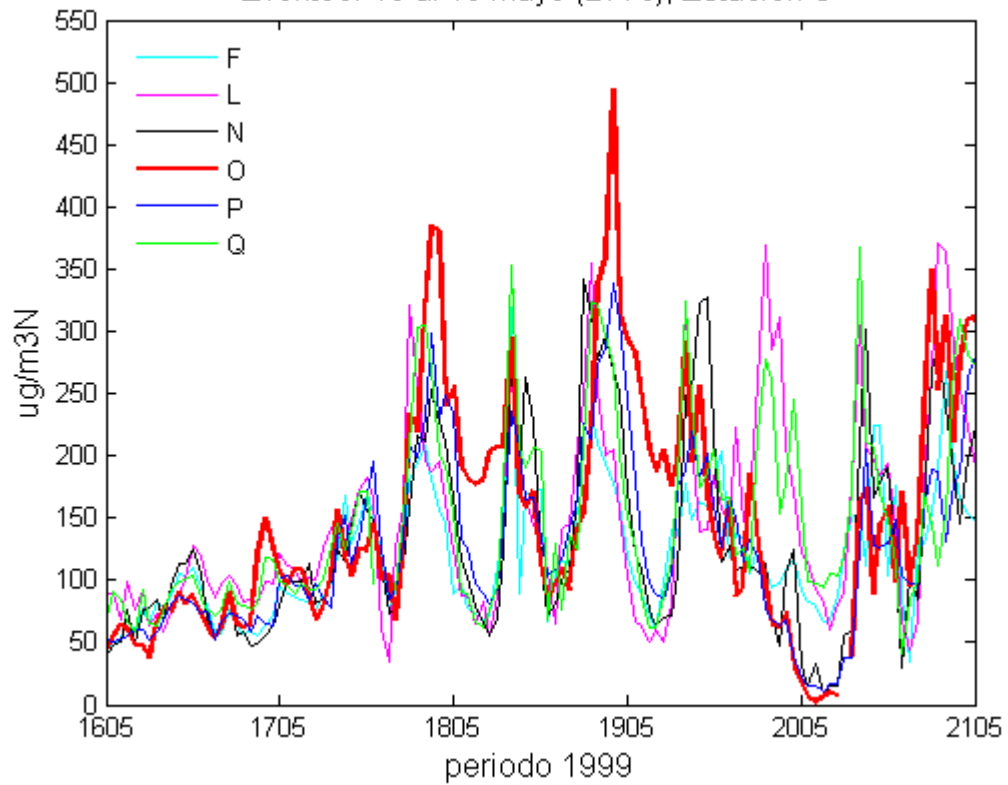




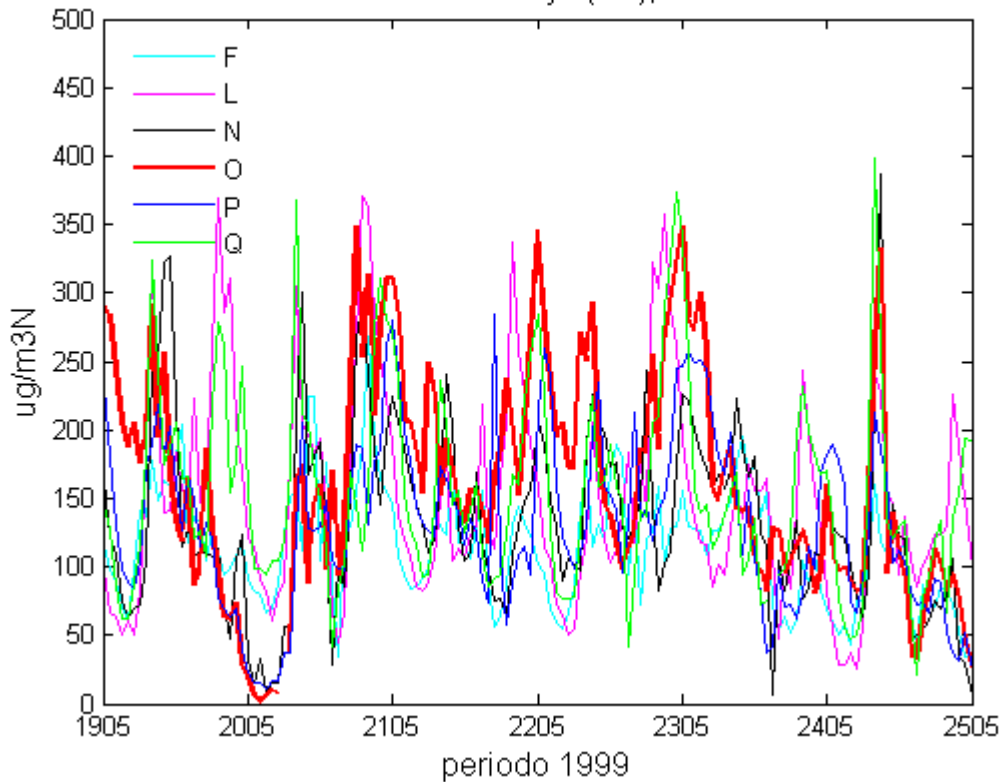
Evento4: 15 al 16 mayo (PF), Estaciones O, Q



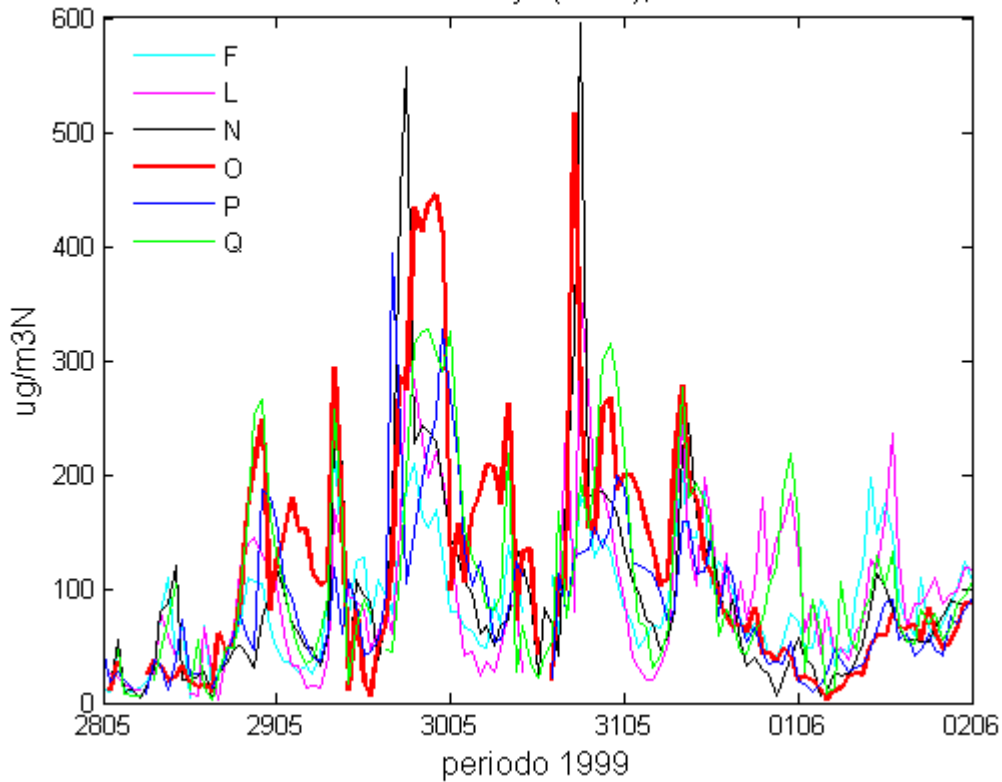
Evento5: 18 al 19 mayo (D/Vc), Estacion O

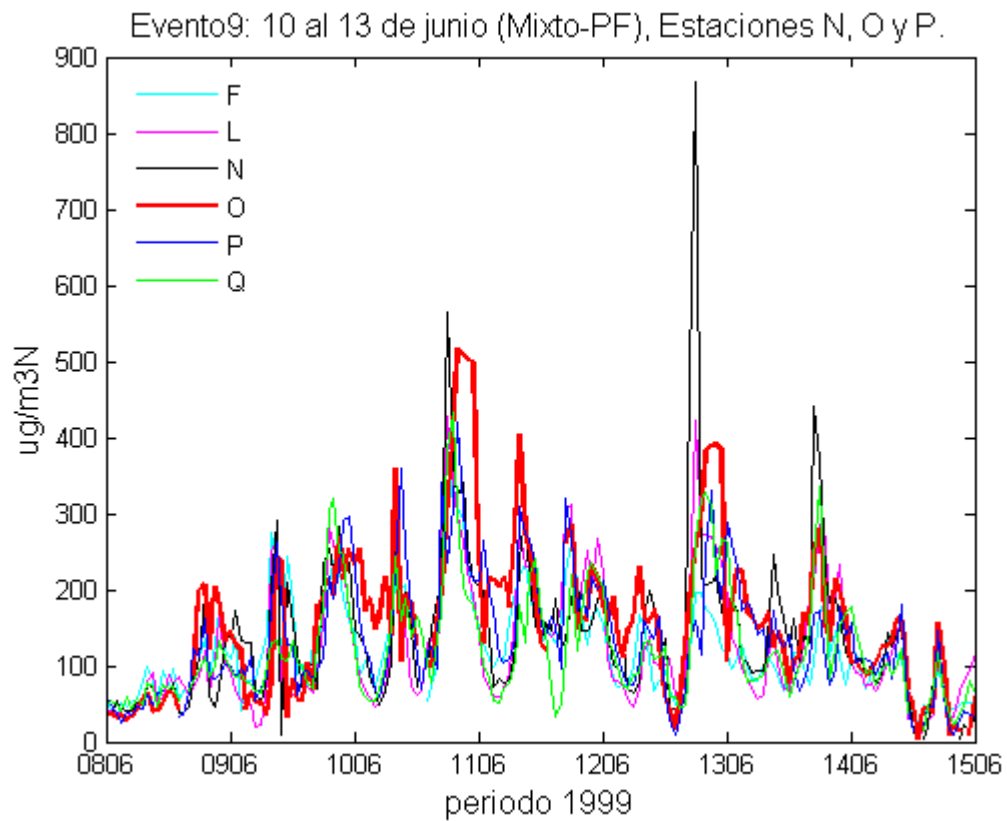
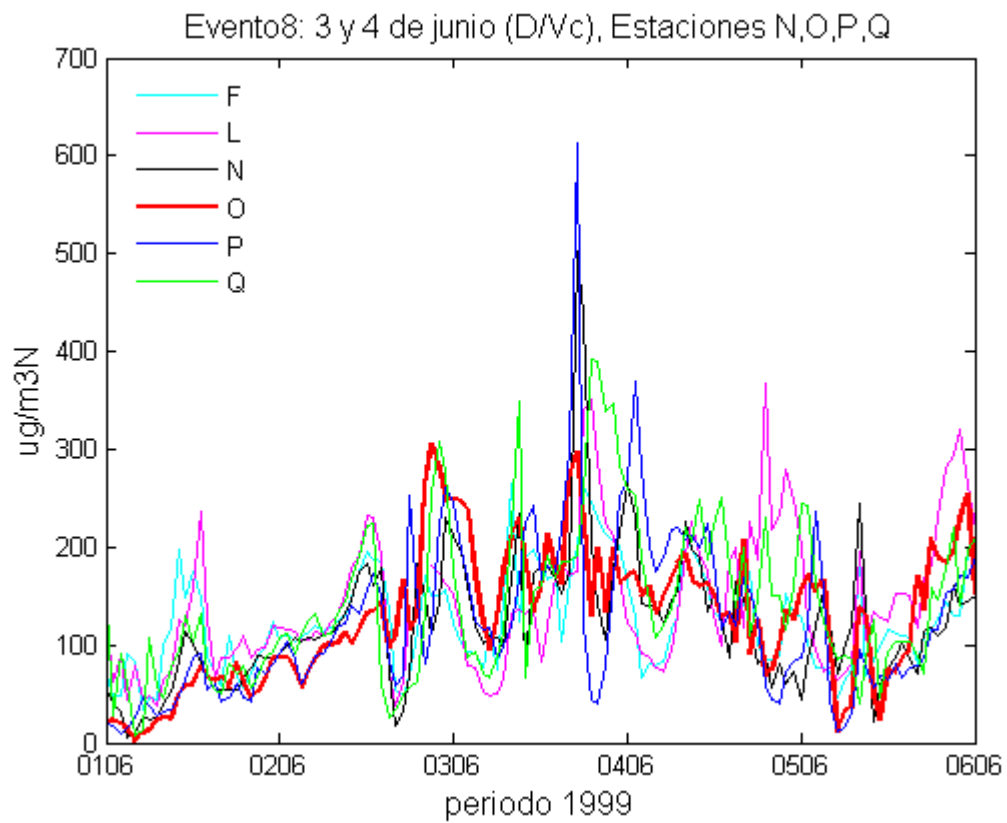


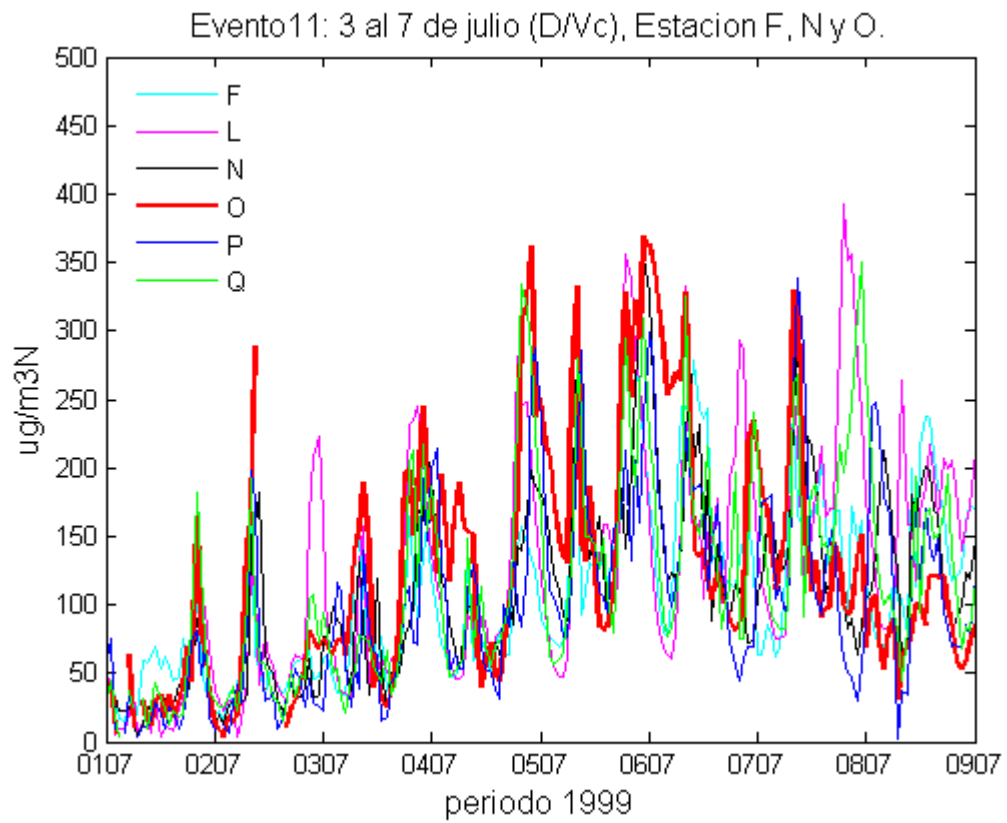
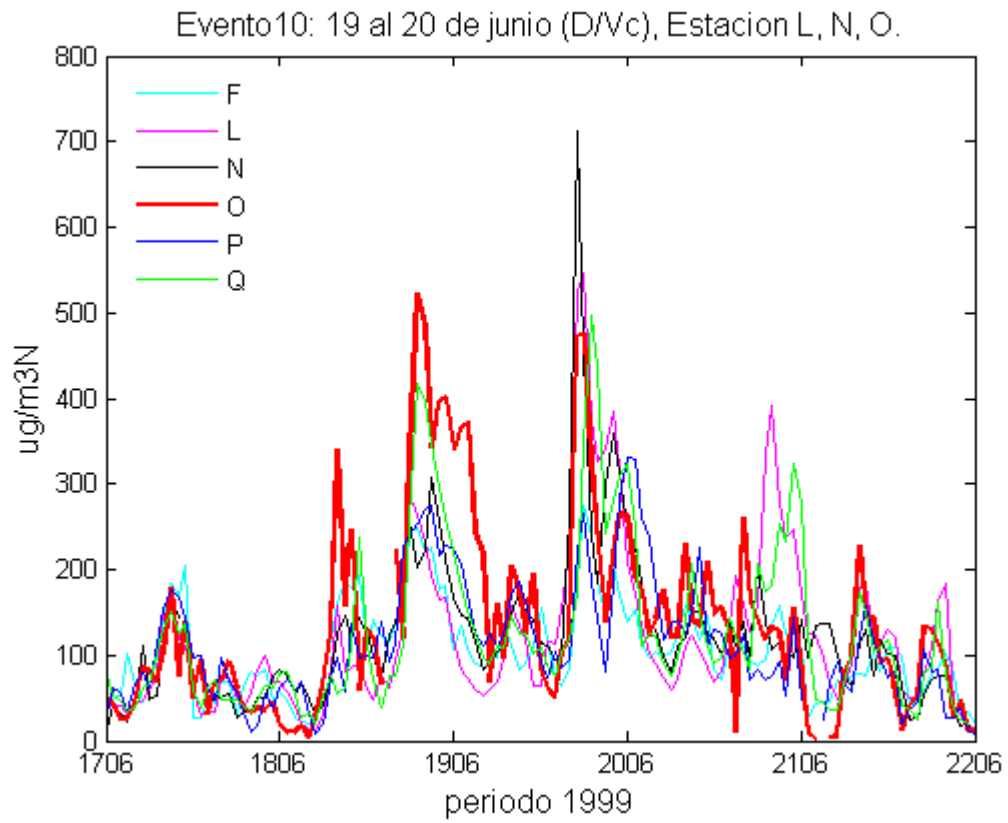
Evento6: 21 al 23 mayo (PF), Estacion O



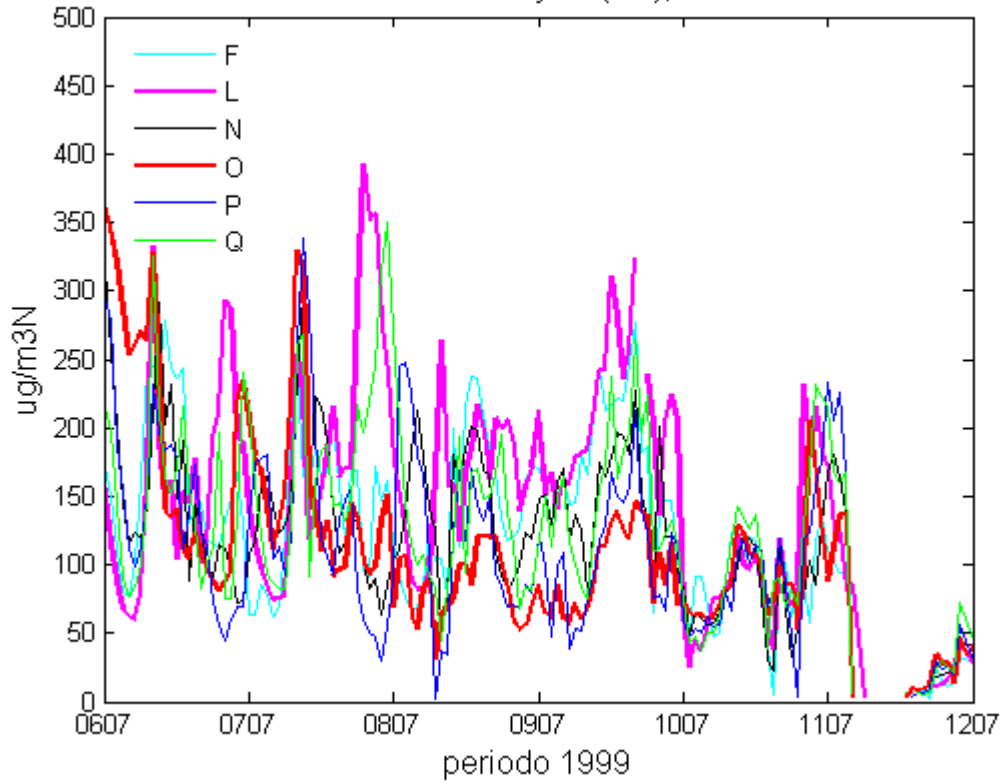
Evento7: 30 de mayo (D/Vc), Estacion O.



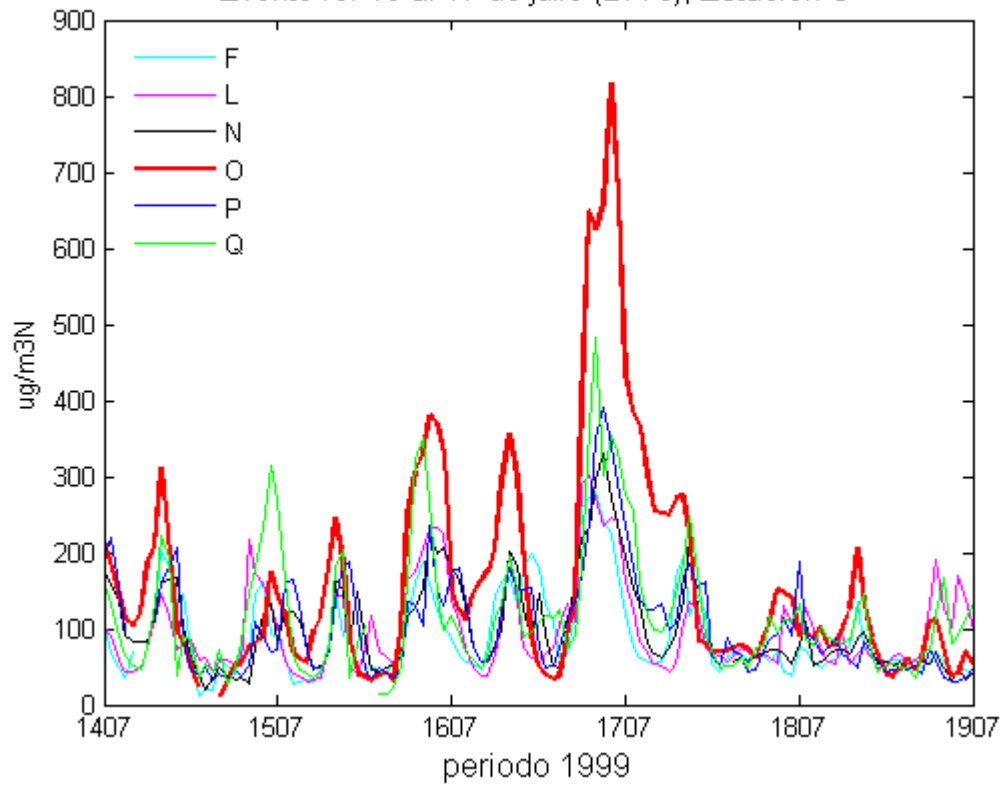




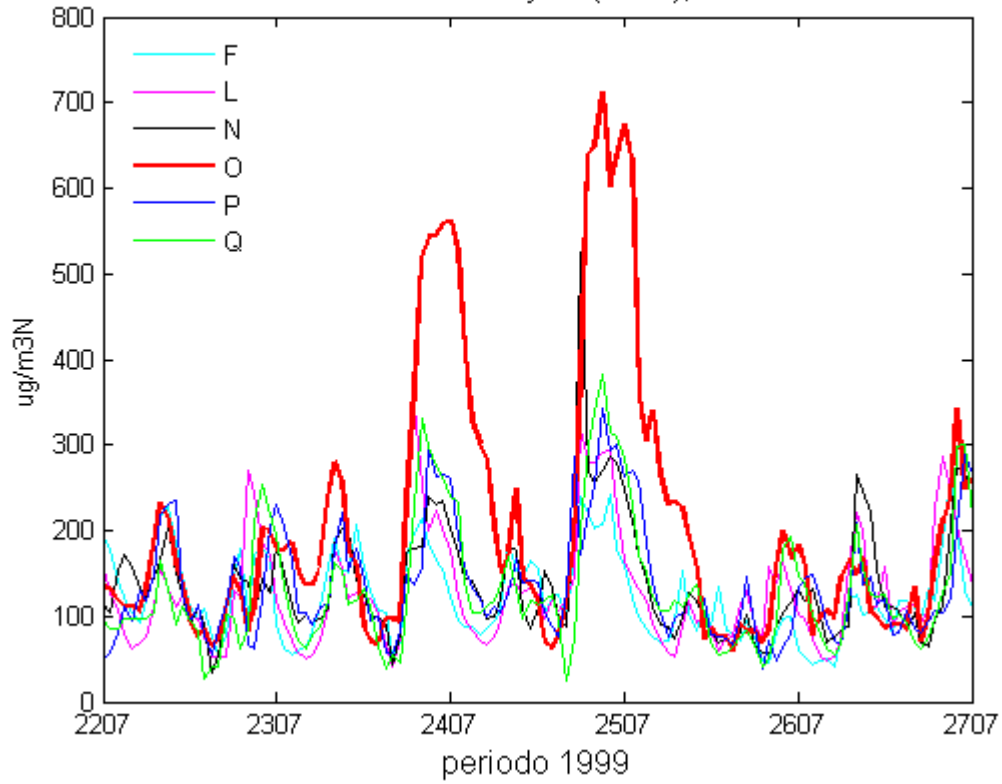
Evento12: 8 al 10 de julio (PF), Estacion L



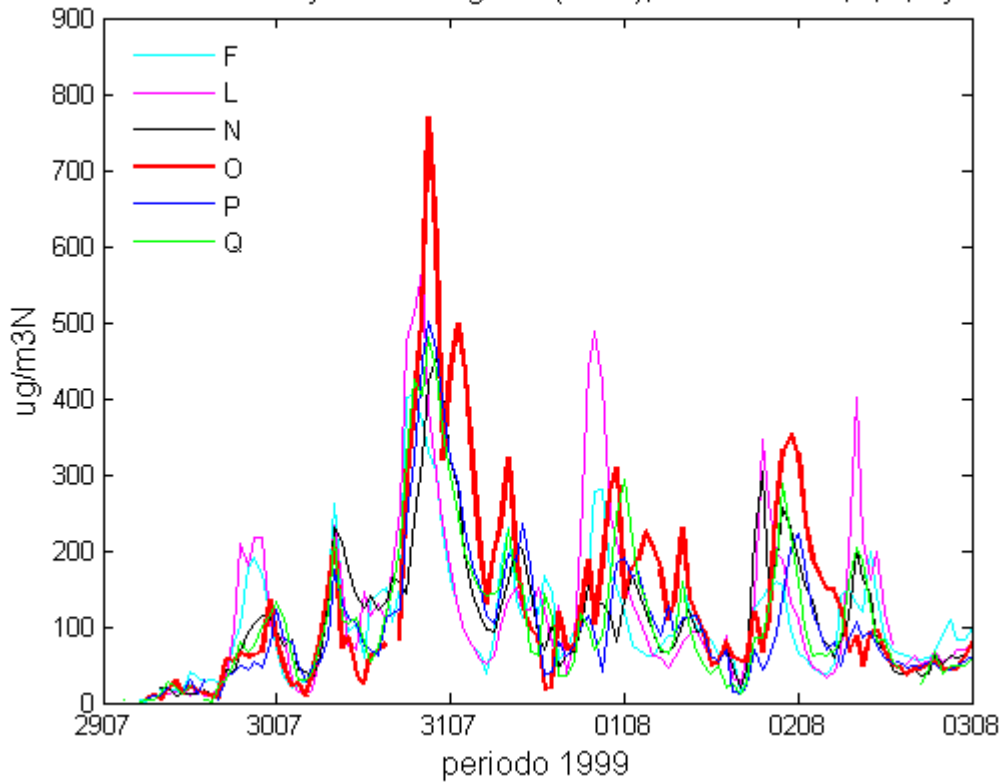
Evento13: 16 al 17 de julio (D/Vc), Estacion O



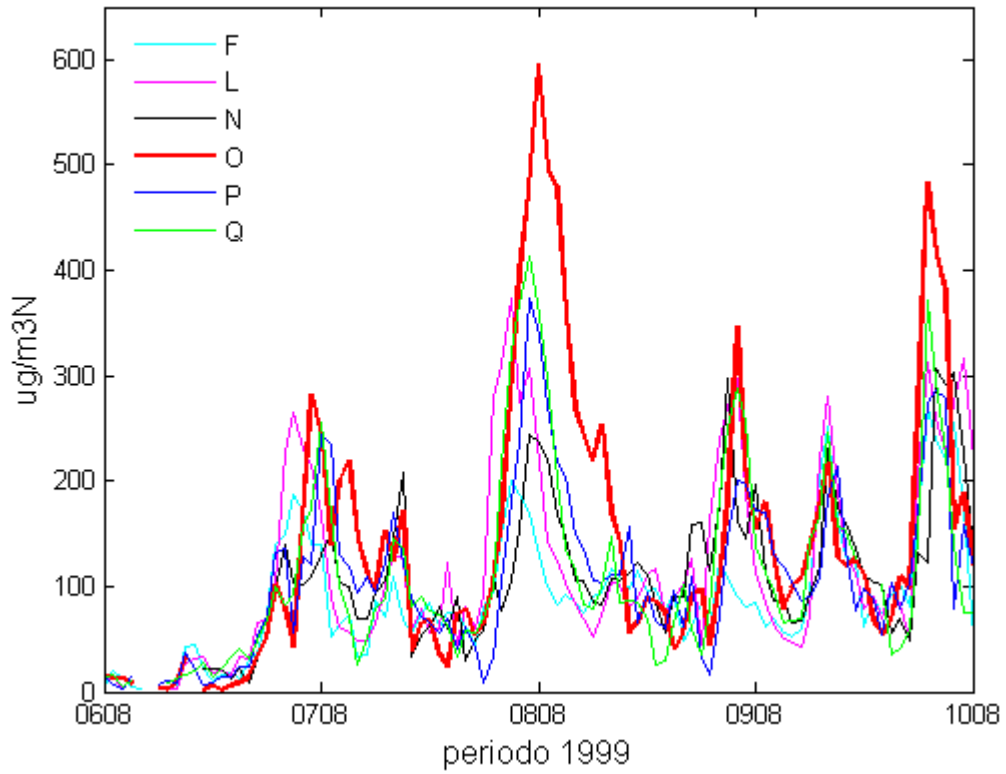
Evento14: 24 al 25 de julio (D/Vc), Estacion O



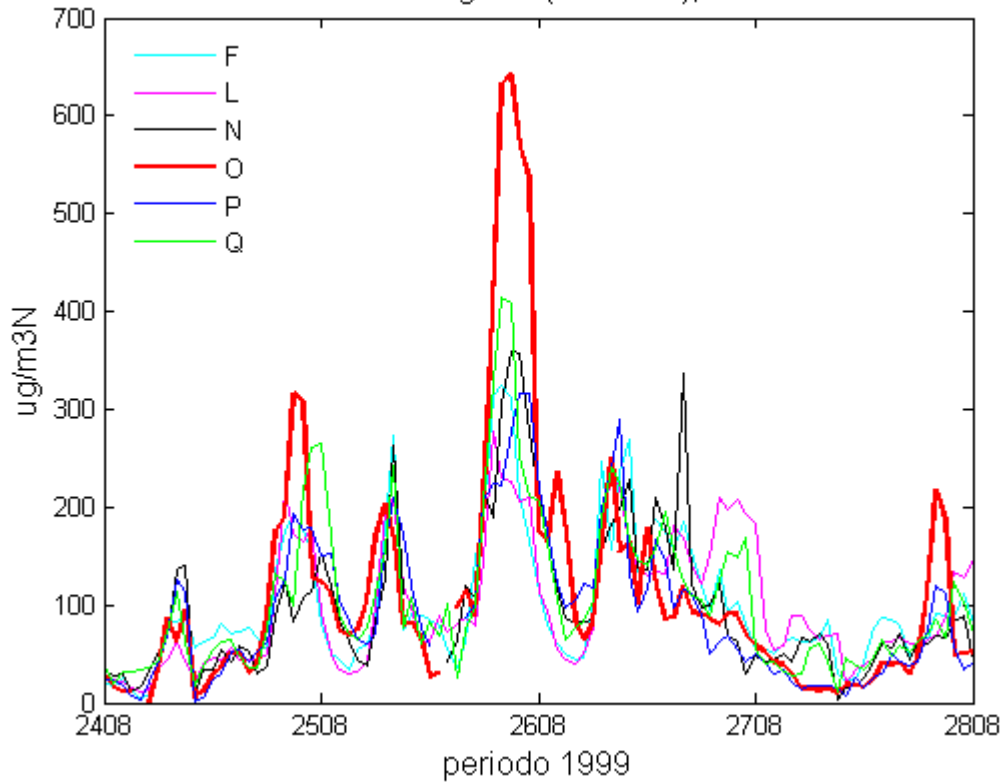
Evento15: 31 de julio al 01 agosto (D/Vc), Estaciones L,N,O,P y Q.



Evento16: 8 de agosto (D/Vc), Estacion O



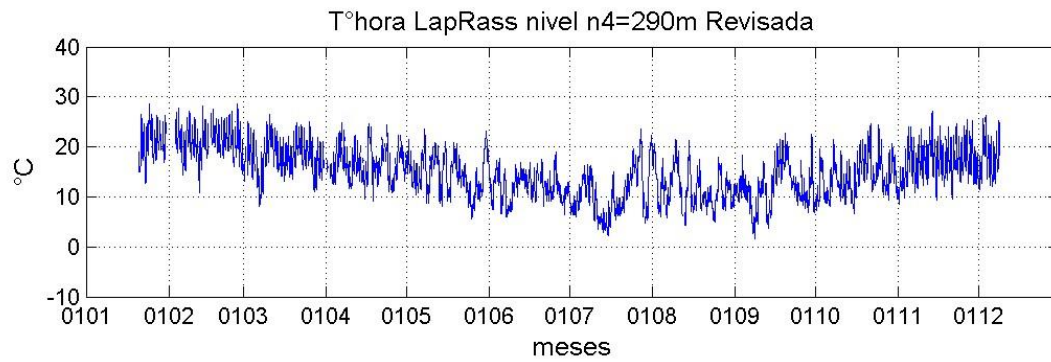
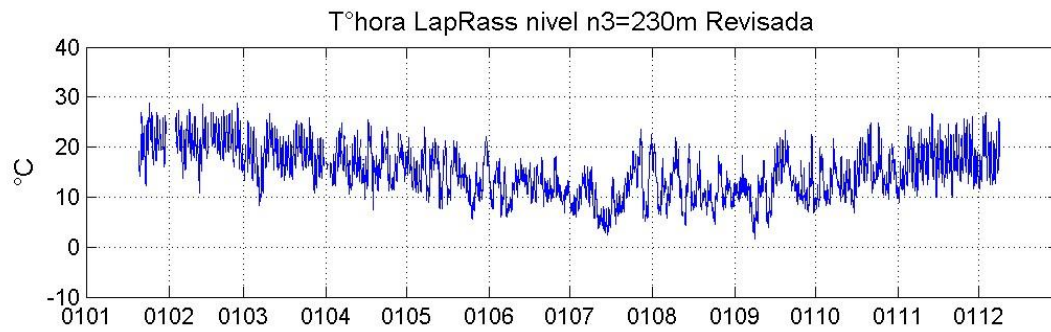
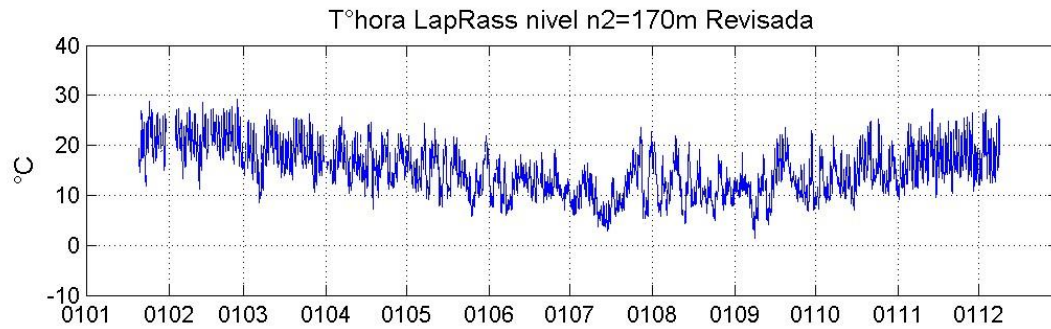
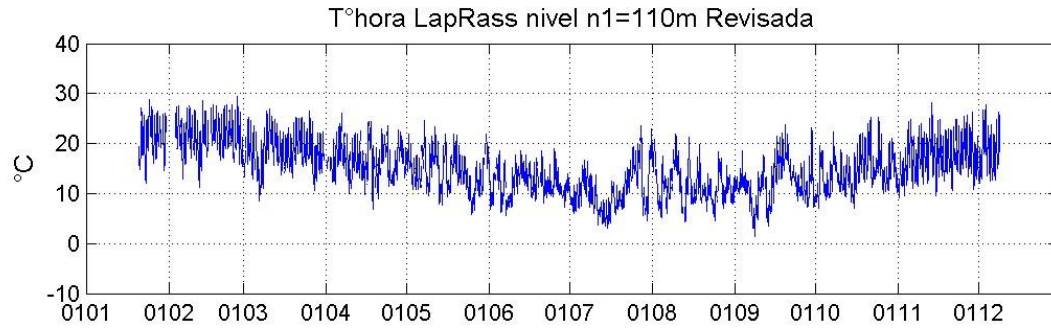
Evento17: 26 de agosto (Mixto-PF), Estacion O.

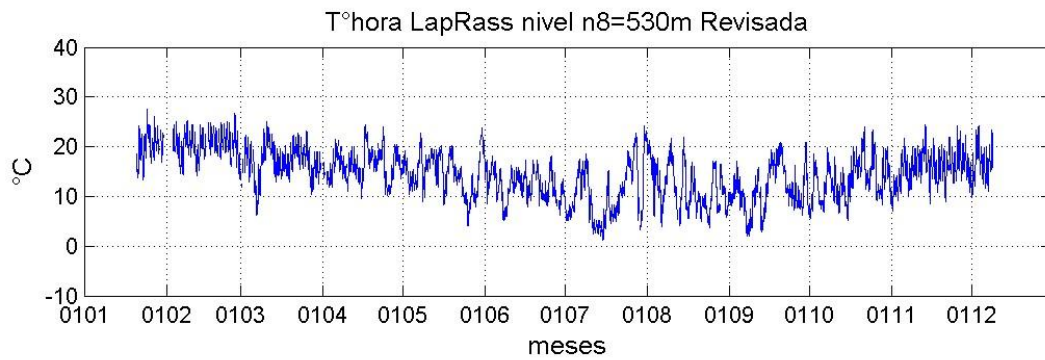
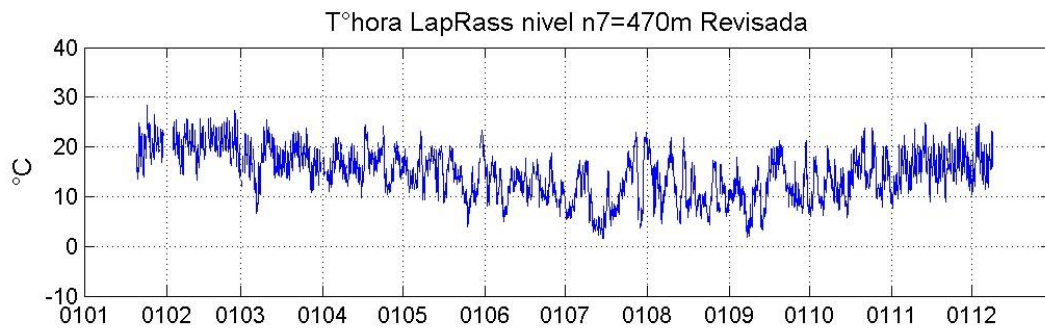
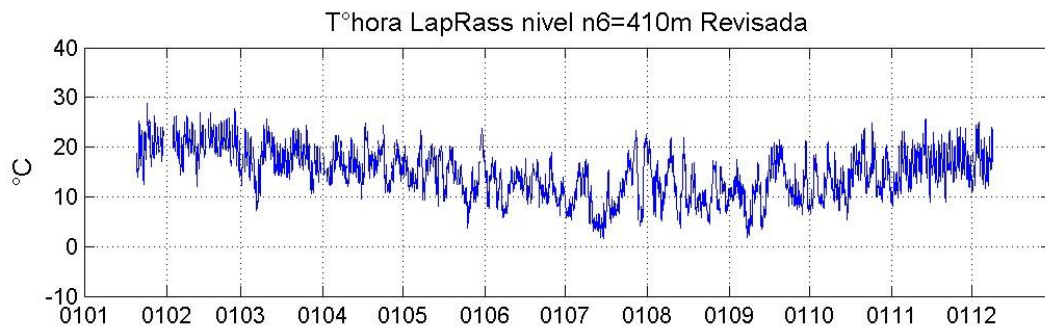
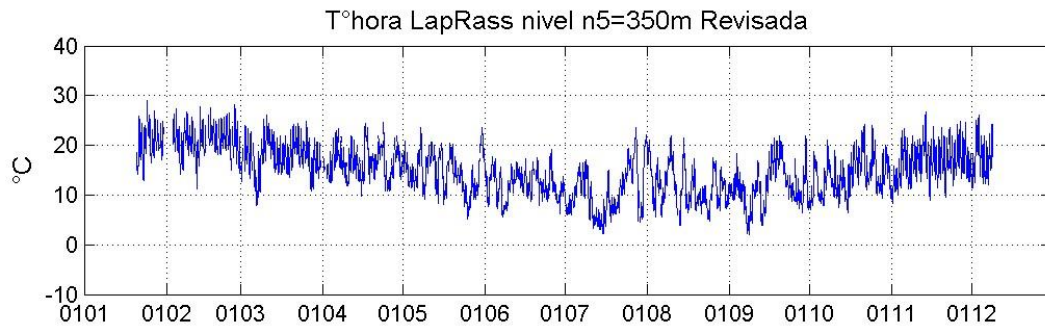


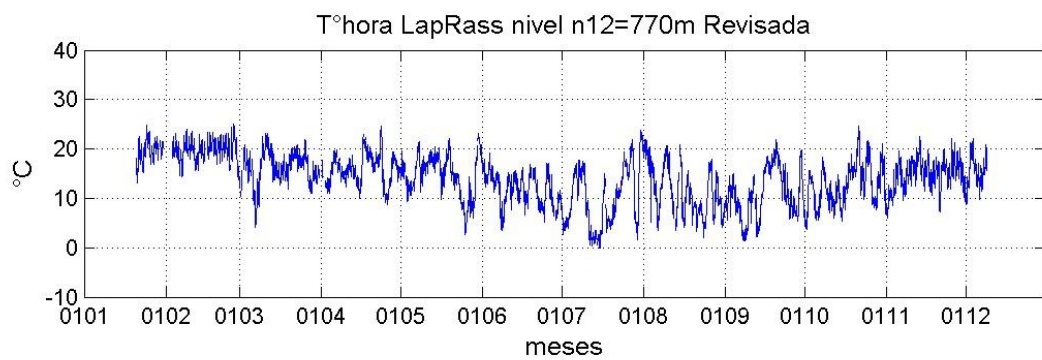
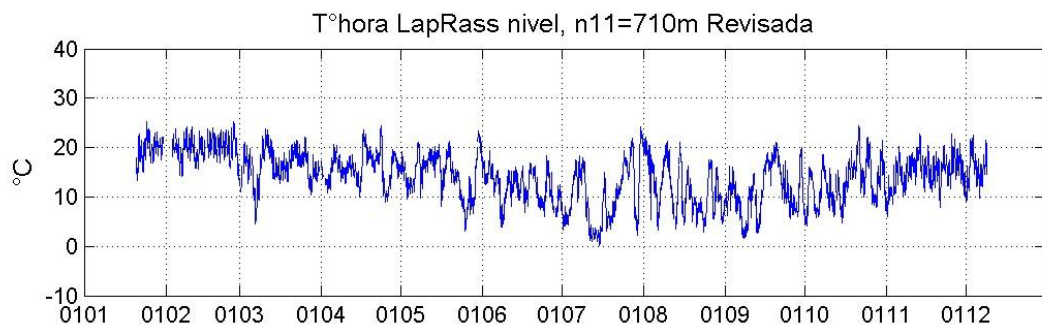
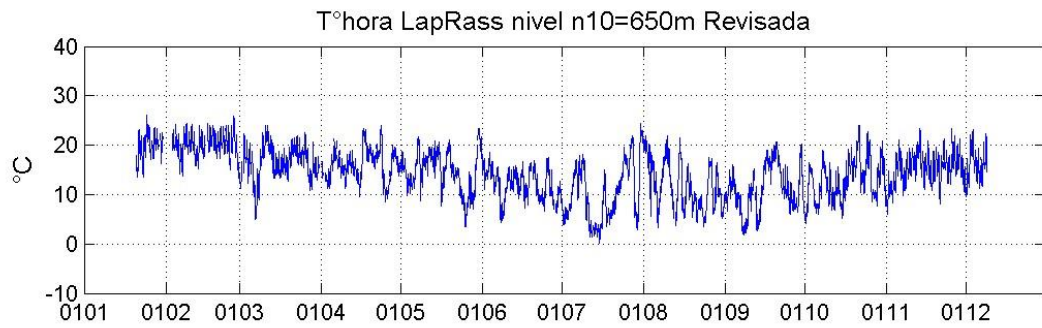
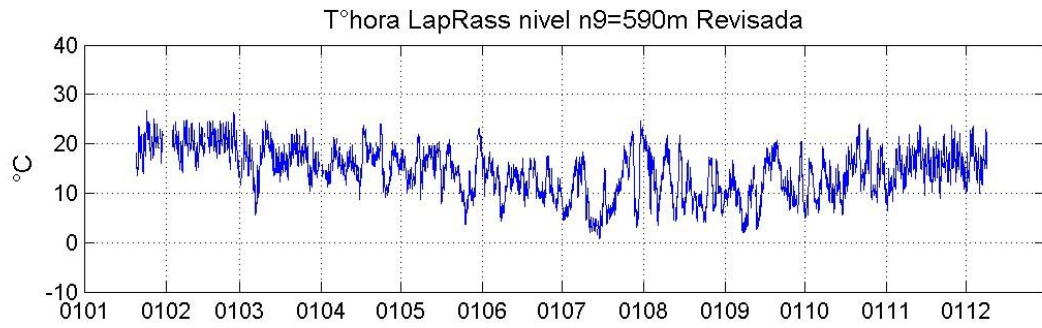


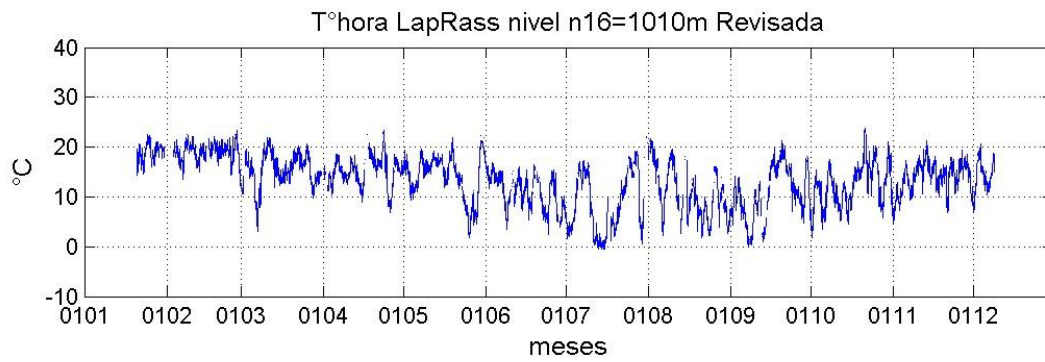
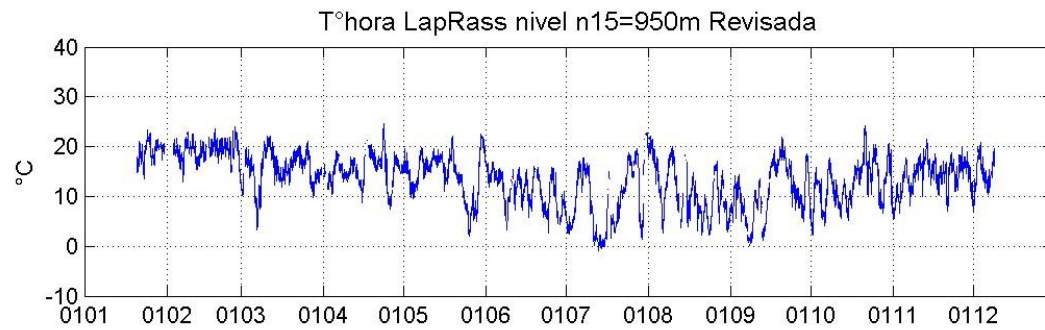
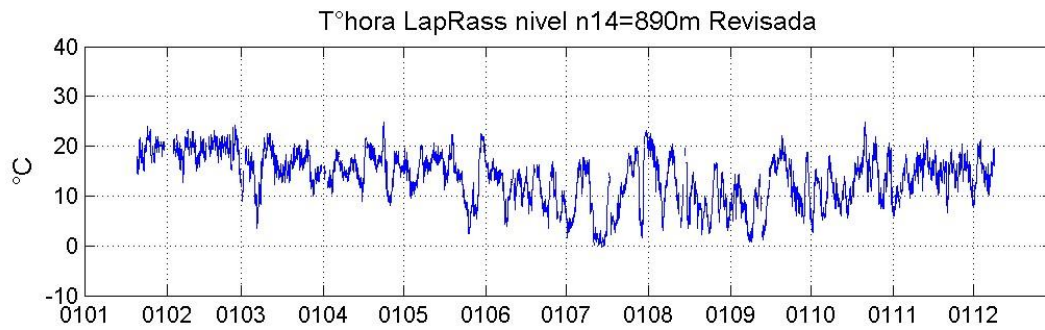
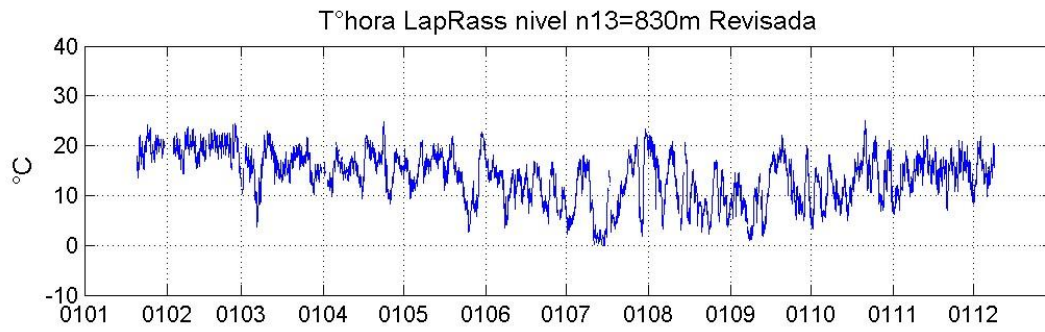
## Anexo 2: Series de tiempo de temperatura utilizadas

### Series de Temperatura equipo LapRass

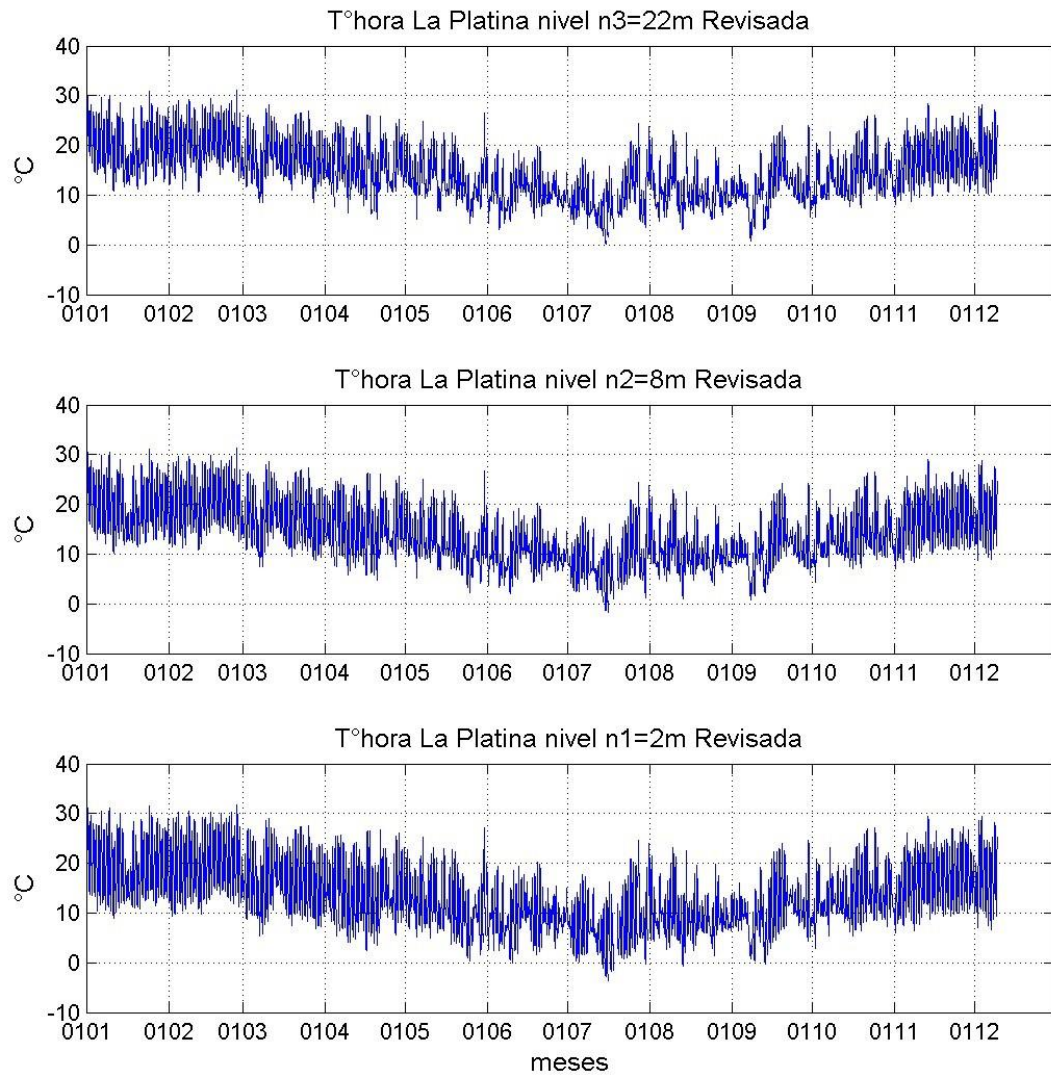




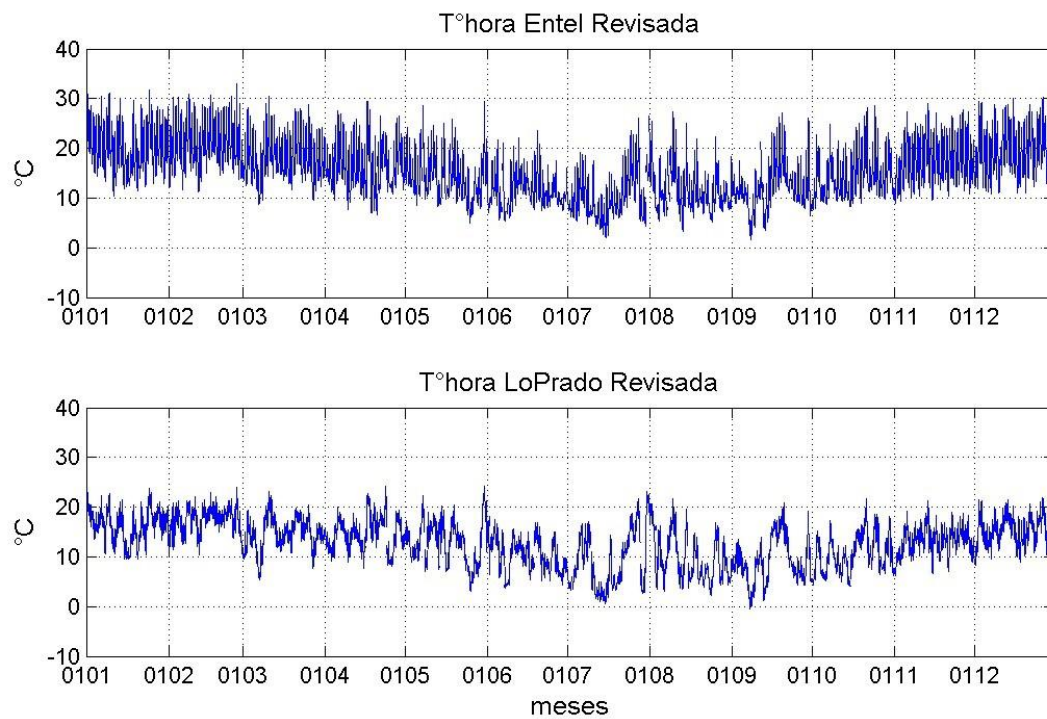




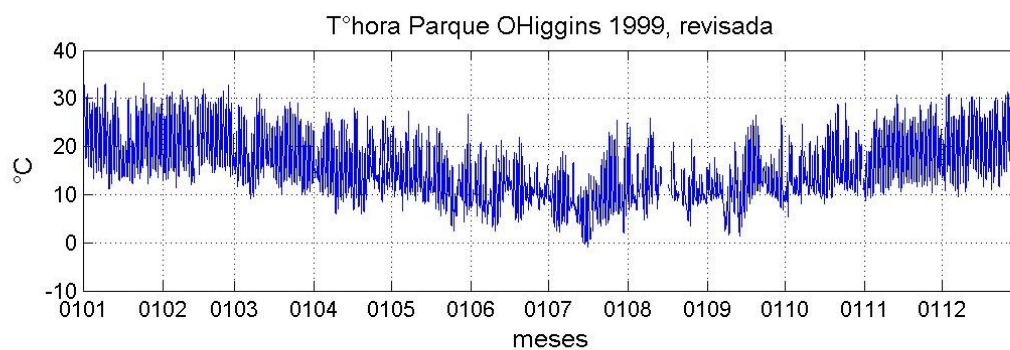
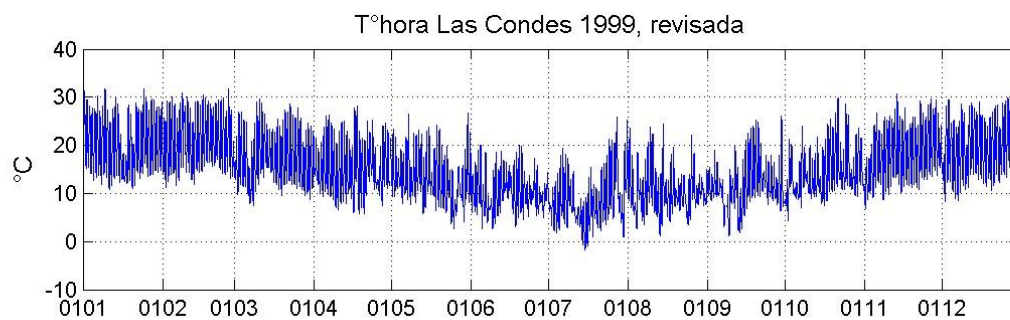
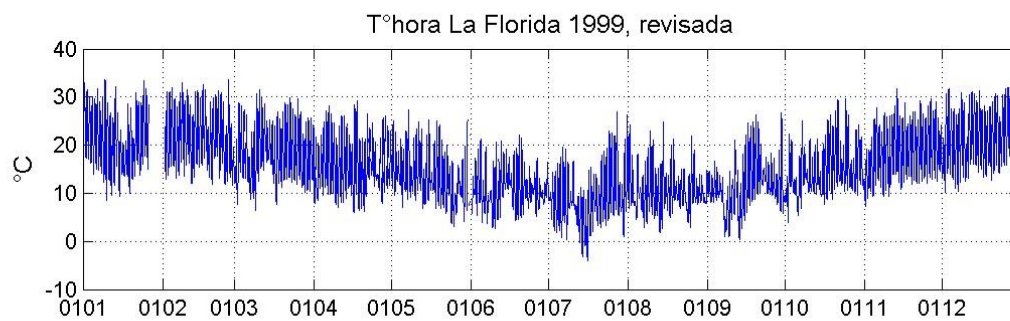
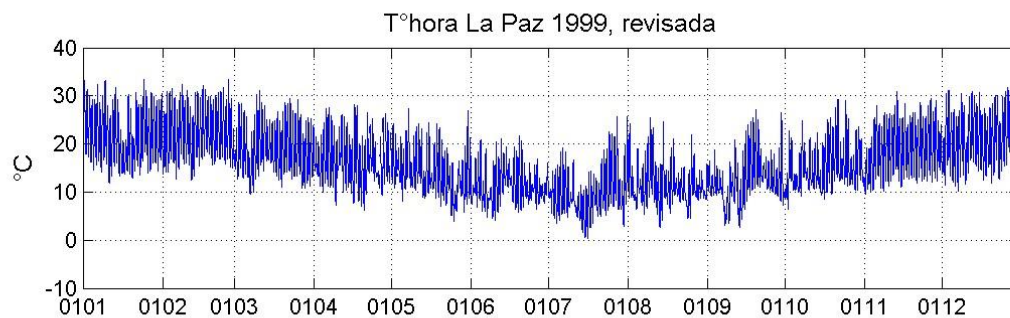
## Series de Temperatura Torre La Platina

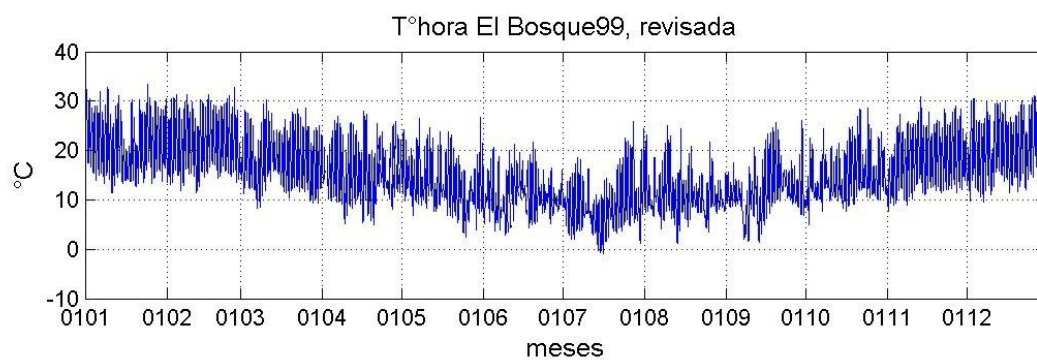
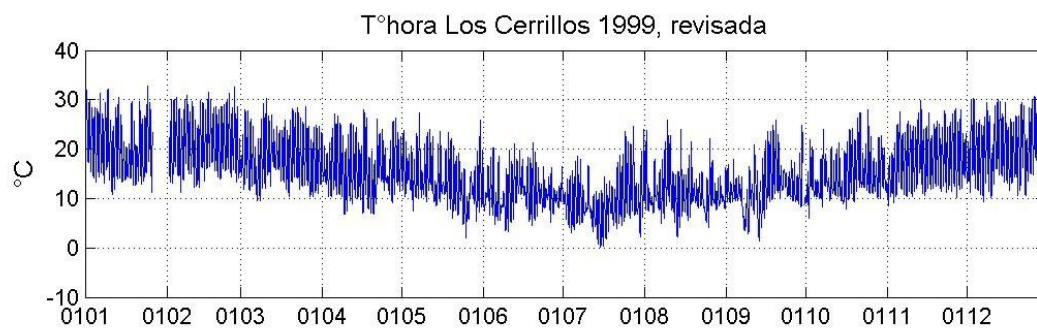
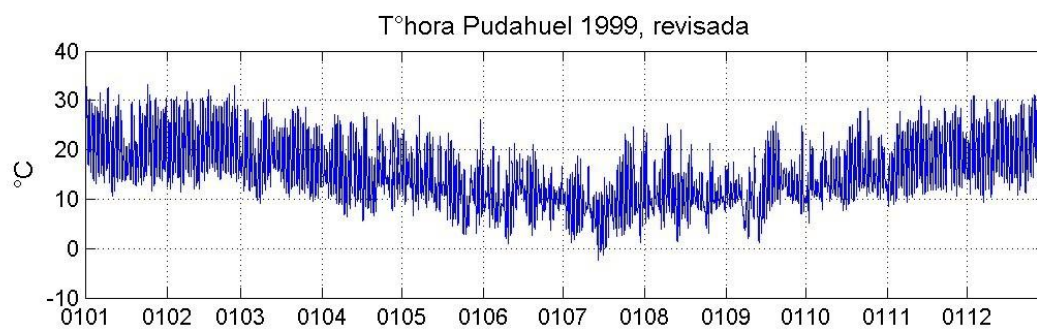


## Serie de Temperatura estación Lo Prado y Torre Entel



## Series Temperatura estaciones Red MACAM







**Anexo 3: Configuraciones sinópticas observadas durante el periodo abril - septiembre 1999.**

Fecha	Tropical				Episodio		Polar					Observación
	Vaguada	Dorsal	Zonal	Advec	A	BPF	F.Activo	F.débil	F.altura	N Frío	A Fría	
01-04-1999										1		N.Frío
02-04-1999										1		N.Frío
03-04-1999										1		N.Frío
04-04-1999		1										Dorsal
05-04-1999		1										Dorsal
06-04-1999			1									Zonal
07-04-1999			1									Zonal
08-04-1999	1											Vaguada
09-04-1999	1			1								Advección débil
10-04-1999	1											Vaguada
11-04-1999			1									Zonal
12-04-1999		1										Dorsal
13-04-1999			1									Zonal
14-04-1999		1										Dorsal
15-04-1999		1										Dorsal
16-04-1999					1							A
17-04-1999					1							A
18-04-1999			1	1								Advec. Niebla
19-04-1999	1			1								Advección débil
20-04-1999	1			1								Advección débil
21-04-1999	1											Vaguada
22-04-1999						1						BPF
23-04-1999						1						BPF
24-04-1999				1					1			Ad. No Sat.
25-04-1999										1		Chubascos
26-04-1999												In. Chubascos
27-04-1999		1										Dorsal
28-04-1999		1										Dorsal
29-04-1999			1									Zonal
30-04-1999			1	1								Ad. No Sat.
01-05-1999	1											Vaguada
02-05-1999	1											Vaguada
03-05-1999	1			1								Adv. DZ
04-05-1999			1	1								Adv. débil
05-05-1999	1			1								Adv
06-05-1999		1										Dorsal
07-05-1999		1										Dorsal
08-05-1999	1			1								Adv
09-05-1999		1		1								Adv. débil
10-05-1999		1										Dorsal
11-05-1999					1							A
12-05-1999					1							A





25-08-1999				1							A
26-08-1999					1						BPF
27-08-1999	1			1							Adv.
28-08-1999			1								Zonal
29-08-1999	1										Vaguada
30-08-1999							1				F.Activo
31-08-1999											Ins.Chubascos

Fuente: Condición sinóptica observada por el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA) bajo el programa de Pronóstico Meteorológico de Calidad del Aire para la Región Metropolitana, periodo 1999. Gentileza Sr. Manuel Merino Th.

## Anexo 4: Brochure Lap-3000 + Rass



# Vaisala Wind Profiler LAP<sup>®</sup>-3000



*Vaisala LAP<sup>®</sup>-3000 and optional RASS for mesoscale observations.*

### Benefits

- Continuous wind data up to 3 km
- Continuous virtual temperature data up to 1.5 km
- Unattended operation
- Minimal periodic maintenance
- New vertical profile every 3-60 minutes

### Lower Atmosphere Wind Profiler for your needs

The Vaisala LAP<sup>®</sup>-3000 is a Doppler beam swinging wind profiler that reliably provides continuous and real-time vertical profiles of horizontal wind speed and direction and vertical velocity up to 3 km above ground level (agl). An optional extended antenna aperture improves the performance by narrowing beam width, increasing antenna gain and reducing side lobes.

When an optional Radio Acoustic Sounding System (RASS) is added to the Vaisala LAP<sup>®</sup>-3000, it will provide virtual temperature profiles up to 1.5 km agl. These altitudes are maximum values and will change dramatically depending on atmospheric conditions, profiler configuration, installation site and surrounding environment. The LAP<sup>®</sup>-3000 operates fully unattended and provides continuous data with high vertical and temporal resolution.

### Software that suits yours application

The flexible Vaisala LAP-XM<sup>™</sup> software allows site-specific optimization of system performance, including variable temporal and range resolution, in support of various applications. The operator can choose signal processing parameters, quality control features, and data formats.

The optional Vaisala Graph-XM<sup>™</sup> graphical display software provides a wide variety of data visualization schemes including

time-height cross sections of wind barbs (vectors), and virtual temperature profiles. The Windows-based data system can archive up to one-year's worth of wind and temperature data in database and text format. Averaged time series, spectra, and moments data can also be archived.

The Vaisala LAP<sup>®</sup>-3000, which operates under Windows<sup>®</sup> XP and features a PCI-based architecture and digital signal processing, was jointly developed under a Cooperative Research and Development Agreement (CRADA) with the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Over 130 LAP<sup>®</sup>-3000 systems have been deployed worldwide.

### Applications

- Air quality
- Arctic/antarctic research
- Atmospheric boundary layer research
- Aviation operations
- Defense
- Emergency response
- Global change research
- Mesoscale meteorological forecasting
- Offshore, shipboard observations
- Vertical wind shear & turbulence
- Weather modification

# Technical Data

## Specification

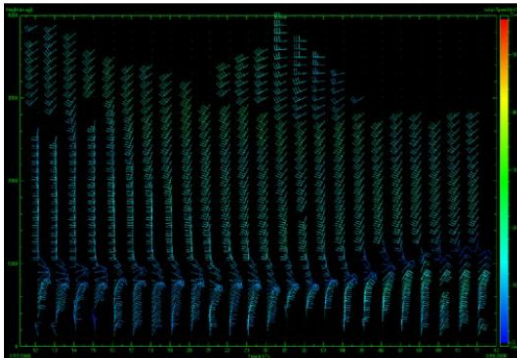
Operating frequency	Typically 915 or 1290 MHz
Minimum height <sup>1</sup>	120 m
Maximum height <sup>2</sup>	up to 3 km
Range resolution (typical)	60, 100, 200, 400 m
	Factory configurable 45 – 500 m
Wind speed accuracy	<1 m/s
Wind direction accuracy	<10 °
Wind averaging time	3-60 minutes
RF power output	600 W peak
	0.1 – 100 W average
Occupied bandwidth @1290 MHz	Less than 12.5 MHz @ 400 ns pulse (99% ITU)
Antenna	
Type	Electrically steerable micropatch phased-array panels
Gain	~26 dBi
	~29 dBi with the extended antenna aperture
RF beam width	~9 °
	~6 ° with the extended antenna aperture
Aperture	2.7 m <sup>2</sup> @ 1290 MHz, 3.0 m <sup>2</sup> @ 915 MHz
	6.0 m <sup>2</sup> @ 1290 MHz, 6.2 m <sup>2</sup> @ 915 MHz (extended antenna aperture)
Power requirements	115 VAC/60 Hz; 15 A
	230 VAC/50 Hz; 10 A

## Options

Hardware Monitor	System monitoring and status reporting
Vaisala Graph-XM™	Graphical display software
Moments display software	Graphical moments data display software
RASS	
Minimum height <sup>1</sup>	120 m
Maximum height <sup>2</sup>	up to 1.5 km
	typically varies between 1 – 1.5 km
Range resolution	60, 100, 200, 400 m
	Factory configurable 45 – 500 m
Temperature accuracy	1 °C
Averaging time	3-60 minutes
RASS aperture	1.2 m <sup>2</sup> x 4 sources
Audio frequency	2-4 kHz,
	Bragg matched to transmitter frequency
Antenna support stand	For easier access to antenna components
Extended antenna aperture	For improved performance
Extended length cables	For increasing the distance from shelter to antenna
GPS timing receiver	For accurate timekeeping
Hub computer	For remote access and monitoring
Services	Site survey, FAT, SAT, training, installation, extended warranty, service contract.
Other operating frequencies	924, 1280, 1299, 1357.5 MHz

<sup>1</sup> Dependent on clutter environment and available radio frequency emission bandwidth.

<sup>2</sup> Dependent on atmospheric scattering conditions, profiler



Data sample for the Vaisala LAP®-3000.



Vaisala LAP®-3000 with optional RASS for air quality monitoring.



Vaisala Oyj  
Helsinki, Finland  
Tel: + 358 9 894 91  
Fax: + 358 9 8949 2227

Vaisala Inc.  
Boulder, USA  
Tel: +1 303 499 1701  
Fax: +1 303 499 1767

For other Vaisala locations  
visit us at:  
[www.vaisala.com](http://www.vaisala.com)

## Optional RASS

- Radio Acoustic Sounding System (RASS)
  - Provides profiles of virtual temperature
  - Achieved by transmitting a short acoustic energy pulse vertically
  - Tone burst propagates as a compression wave with the speed of sound upwards in the atmosphere
  - Wind profiler measures the speed of propagation of the sound burst
  - Since the speed of sound depends mostly on the air temperature, virtual temperature can be computed from the received signal

©Vaisala | 2007 | LAP-3000 presentation | Page 24



## Descending Inversion measured with RASS

