



**CENTRO NACIONAL DEL MEDIOAMBIENTE**

Unidad de Modelación y Gestión de la Calidad del Aire



Universidad de Chile

**Informe de Actividad 4.1.2  
Desarrollo de un Modelo de Pronóstico de  
Calidad de Aire por MP10 para Rancagua**

**Santiago de Chile  
Enero, 2010**



## CENTRO NACIONAL DEL MEDIOAMBIENTE

Unidad de Modelación y Gestión de la Calidad del Aire



Universidad de Chile

©2010 Centro Nacional del Medio Ambiente  
Universidad de Chile

Al cierre de la edición del presente informe la Dirección de la Fundación Centro Nacional del Medio Ambiente está conformada por:

*Prof. Víctor Pérez V.*  
Rector de la Universidad de Chile,  
Presidente de la Fundación CENMA

*Prof. Italo Serey E.*  
Profesor Titular Universidad de Chile  
Director Ejecutivo de la Fundación CENMA

### Sobre el Informe

El presente trabajo corresponde a la primera fase del estudio desarrollo e implementación de un sistema de pronóstico de calidad del aire por MP10 de corte estadístico para Rancagua

### Derechos de autor y/u otras leyes aplicables



<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/cl/>

La obra está protegida por derechos de autor y/u otras leyes aplicables de acuerdo a los términos de licencia Creative Commons.

Queda prohibido cualquier uso que se haga de la obra que no cuente con la autorización pertinente de conformidad con los términos de la licencia.

### Informe preparado por

Unidad de Modelación y Gestión de la Calidad del Aire

### Jefe de Unidad y Director de Proyectos Prioritarios de Calidad de Aire Mandatados por el Gobierno

Dr. Rodrigo Seguel A.

### Jefe de Proyecto

Maureen Amín D.

### Equipo Profesional

Manuel Merino Th.

Diego Campos D.

### Más información

Centro Nacional del Medio Ambiente  
Av. Larraín 9975, La Reina, Santiago de Chile

Teléfono: (56-2) 299-4100

Fax : (56-2) 275-1688

<http://www.cenma.cl>



## Índice General

1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. ANTECEDENTES GENERALES.....	6
3. OBJETIVOS.....	8
OBJETIVO GENERAL	8
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
4. DESCRIPCIÓN DE LOS PATRONES METEOROLÓGICOS Y CALIDAD DE AIRE QUE MODULAN LOS EPISODIOS CRÍTICOS DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN RANCAGUA ....	9
5. PRONÓSTICO DE EPISODIOS DE CONTAMINACIÓN EN RANCAGUA.....	11
5.1 ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE PRONÓSTICO DE CALIDAD DE AIRE POR MP10.....	11
5.2 INFORMACIÓN UTILIZADA RELACIÓN ATMÓSFERA Y CALIDAD DE AIRE.....	12
5.3 DESCRIPCIÓN DE LA BASE DE DATOS.....	18
6. ANÁLISIS DE RELACIONES ENTRE LAS VARIABLES UTILIZADAS EN EL ESTUDIO.	19
6.1 ANÁLISIS DE RELACIONES ENTRE VARIABLES DE LA BASE DE DATOS INICIAL.....	19
6.2 METODOLOGÍA UTILIZADA.....	19
6.3 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES PARA LAS POSIBLES VARIABLES PREDICTORAS PARA MP10 FIJO	20
6.4 ANÁLISIS DE RELACIONES ENTRE CONCENTRACIONES DE MP10 Y VARIABLES METEOROLÓGICAS.....	21
7. ECUACIONES DE PRONÓSTICO PARA CONCENTRACIONES DE MP10 MEDIANTE REGRESIÓN.....	
LINEAL MÚLTIPLE .....	25
METODOLOGÍA UTILIZADA.....	25
METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN UTILIZADA.....	29
RESULTADOS ECUACIONES DE PRONÓSTICO CONSIDERANDO PROMEDIOS DE MP10 FIJOS 6 A 6.....	31
8. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN.....	40
FASE 1 DEL PROYECTO: DESARROLLO DE UN MODELO DE PRONÓSTICO MP10 PARA RANCAGUA.....	40
FASE 2 DEL PROYECTO: IMPLEMENTACIÓN Y OPERACIÓN SISTEMA DE PRONÓSTICO PARA RANCAGUA	42
9. ANEXOS. ....	44



## CENTRO NACIONAL DEL MEDIOAMBIENTE

Unidad de Modelación y Gestión de la Calidad del Aire



Universidad de Chile

---

DEFINICIÓN DE EPISODIOS TIPO A Y BPF QUE AFECTAN A RANCAGUA.....	44
DEFINICIÓN CATEGORÍAS PMCA PARA RANCAGUA BASADO EN LA CLASIFICACIÓN REALIZADA PARA SANTIAGO.....	46
DESCRIPCIÓN BASE DE DATOS.....	48
ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LAS VARIABLES USADAS EN EL ESTUDIO.....	51
CONTENIDO REPORTES DIARIOS DE PRONÓSTICO.....	52



## 1. Introducción

Tras la declaración de zona saturada por MP10 como concentración anual y como promedio de 24 horas al valle central de la región de O'Higgins, se dio inicio al proceso de elaboración e implementación del Plan de Descontaminación Atmosférica (PDA).

Bajo este contexto, la primera fase de este proyecto consistirá en el desarrollo de un modelo de calidad de aire de tipo estadístico para la ciudad de Rancagua, capaz de inferir concentraciones de MP10 para el día siguiente.

Se tomará como referente la tipificación de las condiciones meteorológicas de la zona central del país, para luego definir un índice meteorológico que represente las condiciones de ventilación de la ciudad de Rancagua.

Posteriormente, se elaborará un sistema de pronóstico de calidad del aire, cuya puesta en marcha corresponde a la segunda fase del proyecto, la que se ejecutará durante el periodo otoño invierno de 2010, desde abril a septiembre. Los resultados del sistema de pronóstico serán sometidos a evaluación técnica y luego puestos a disposición de las autoridades para la aplicación de medidas de tipo informativas y/o preventivas.

El presente documento corresponde al Informe Final, preparado por la Unidad de Modelación y Gestión de la Calidad de Aire del Centro Nacional del Medio Ambiente, en el marco de la ejecución del Estudio "Desarrollo de un sistema de pronóstico para la Región de O'Higgins".



## 2. Antecedentes Generales

El Centro Nacional del Medio Ambiente desde 1997 ejecuta y desarrolla sistemas de pronóstico de Calidad de Aire. Actualmente opera el sistema de pronóstico de calidad de aire para Santiago (Material Particulado y Ozono troposférico); y desarrolló y opera diariamente pronósticos de condiciones meteorológicas asociadas a mala ventilación junto a un modelo de calidad de aire para la ciudad de Temuco.

La experiencia alcanzada en CENMA en el desarrollo e implementación de estos sistemas de pronóstico, permite su replicación en otras ciudades del país, particularmente en aquellas que han sido declaradas "zona saturada" o "latente", como es el caso de Rancagua respecto al MP10.

Un modelo de pronóstico de calidad del aire por MP10, determina los niveles previstos de este contaminante para el día siguiente, o días subsiguientes. Los resultados entregados van normalmente acompañados de una opinión experta.

La declaración de un episodio por parte de la autoridad no implica, necesariamente, que el aire haya empeorado al momento de tomarse la medida, sino que el modelo de pronóstico y la opinión de los expertos indican que existe una alta probabilidad de que la calidad de aire empeore, y alcance niveles de alerta o preemergencia. Es decir, la declaración de episodios y la aplicación de medidas de mitigación y de información a la ciudadanía se decretan normalmente en forma preventiva, buscando evitar que se alcancen los niveles pronosticados, protegiendo así la salud de la población.

Para una adecuada gestión de episodios se requiere operar un modelo de pronóstico validado y contar con información en línea de mediciones de calidad de aire y parámetros meteorológicos. Se necesita de especialistas que efectúen un seguimiento diario y continuo de la evolución de los diferentes parámetros, determinen el valor pronosticado y observado del índice de Potencial Meteorológico de Contaminación



Atmosférica (PMCA), y entreguen además una opinión respecto a los resultados proporcionados por el modelo.

Actualmente, se cuenta con estaciones de monitoreo de MP10 en Rancagua, con su correspondiente estación meteorológica. Ésta es administrada por la SEREMI de Salud VI región y operadas por el Centro Nacional del Medio Ambiente. Los datos entregados apoyarán el sistema de pronóstico de calidad de aire, al permitir determinar las condiciones de estabilidad y dispersión a niveles bajos (cerca de la superficie).

El estudio busca desarrollar ecuaciones de pronóstico para MP10 que incluyan el PMCA, ya que este índice ayuda a consolidar la modelación estadística, integrando el pronóstico de las condiciones meteorológicas asociadas a calidad de aire. El PMCA además tiene la virtud de flexibilizar el ajuste de las ecuaciones en caso que se presenten fenómenos meteorológicos de rápido desarrollo temporal y que puedan determinar un cambio abrupto de las condiciones.

Para la implementación de un adecuado Plan Operacional ante episodios críticos que permita tomar medidas eficientes y oportunas que apunten a proteger la salud de la población, reduciendo la exposición de ésta a altos niveles de contaminación por MP10, es necesario considerar tres líneas de acción: la implementación de un modelo de calidad de aire que permita predecir altas concentraciones de MP10, la implementación de medidas de mitigación y la entrega de información y recomendaciones a la población.

La tarea fundamental de la Gestión de Episodios en la experiencia de Santiago es prevenir el efecto adverso de los contaminantes en la salud de la población y aplicar eficazmente las medidas apuntando a reducir las concentraciones de contaminantes hasta niveles aceptables. Pero, para el caso específico de Rancagua, en donde las concentraciones son menores a las observadas en Santiago y con una realidad local



muy diferente, se propondrá una única aplicación del sistema de pronóstico, de tipo preventiva/informativa.

De las estaciones monitoras automáticas existentes en la región de O'Higgins, sólo la estación de Rancagua cumple con los requisitos para implementar el 2010 un modelo de pronóstico de corte estadístico, ya que se necesita un mínimo de información de 3 años (temporadas abril a septiembre) para poder desarrollar este tipo de ecuaciones predictivas.

Como las estaciones de Rengo y San Fernando fueron instaladas en Agosto de 2007, se podrían desarrollar ecuaciones de pronóstico finalizada la temporada de episodios 2010, para operarlas durante el periodo otoño invierno 2011.

### 3. Objetivos

#### Objetivo general

Desarrollar e implementar un sistema de pronóstico de calidad de aire por MP10 para la ciudad de Rancagua.

#### Objetivos Específicos

- Realizar un estudio de las condiciones meteorológicas asociadas a distintos niveles de calidad de aire por MP10 en la región.
- Desarrollar un modelo de pronóstico de calidad de aire por MP10, con capacidad de pronosticar con 24 horas de anticipación o más, los niveles de calidad de aire esperados.
- Diseñar y operar un sistema de pronóstico de calidad de aire por MP10 durante el periodo otoño invierno 2010, que contemple un pronóstico de condiciones meteorológicas asociadas a contaminación atmosférica y un pronóstico de calidad de aire que infiera la categoría de calidad de aire esperada.



#### **4. Descripción de los patrones meteorológicos y calidad de aire que modulan los episodios críticos de contaminación atmosférica en Rancagua**

Durante el período otoño e invierno la población de la ciudad de Rancagua y otras comunas se ven afectadas por un aumento significativo en los niveles de contaminación del aire por MP10, sobrepasándose en algunos días no solamente la norma diaria, sino también el nivel de alerta, y en algunos casos el de preemergencia. Estas situaciones son conocidas genéricamente como episodios críticos de contaminación atmosférica.

Los episodios se originan mayoritariamente por iguales circunstancias atmosféricas que en Santiago en los meses fríos (abril a agosto), típicamente a partir de la presencia de factores meteorológicos que determinan condiciones de mala ventilación, y frecuentemente asociado a un incremento en las emisiones. En el resto del año las concentraciones de MP10 son bajas.

Las condiciones sinópticas asociadas a episodios de contaminación y consecuentemente a un bajo factor de ventilación se definieron como A y BPF, de acuerdo a la clasificación de J. Rutllant (1994). La configuración tipo A se caracteriza por la irrupción de una dorsal cálida en la troposfera media, reemplazando a una vaguada en altura. En niveles bajos se produce la formación de una vaguada costera entre la alta presión subtropical al oeste y una alta presión fría migratoria al este de la cordillera de Los Andes. La configuración BPF se caracteriza por la presencia de una vaguada en la troposfera media, acompañando a un sistema frontal débil u ocluido, mientras que al este de la cordillera de Los Andes se observa un centro de bajas presiones, con la alta presión fría desplazada hacia el Océano Atlántico. Esta condición está normalmente asociada a una cobertura nubosa prefrontal del tipo media y alta, y bajo factor de ventilación.

Es sabido que, en general, la contaminación atmosférica se acentúa con la estabilidad del aire en niveles bajos. Como estas condiciones de estabilidad están determinadas por sistemas de mayor escala atmosférica, se observó y determinó que los problemas de contaminación que afectan a Rancagua, están directamente relacionados con fenómenos atmosféricos que conducen a condiciones de mala ventilación y dispersión de contaminantes en Santiago por la cercanía de ambas ciudades.

Por tal motivo, la experiencia acumulada en CENMA en la Región Metropolitana podrá aplicarse y perfeccionarse en la Región de O'Higgins.

Para el estudio de las condiciones sinópticas se cuenta con el apoyo de redes de estaciones de superficie, radiosonda, imágenes sateliticas y modelos numéricos de pronóstico del tiempo.

Durante el período de estudio mayo a julio de los años 2004 a 2008, se registraron días de superación de la norma, episodios de Alerta y Preemergencia en la estación monitorea de Rancagua, los cuales se contabilizan en la siguiente figura.

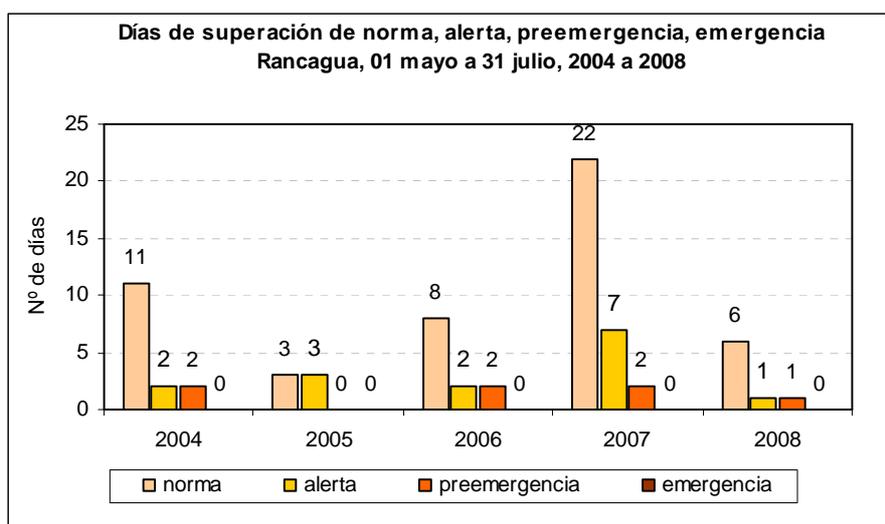


Figura 1 Días de superación de norma y de episodios de contaminación atmosférica por MP10 en Rancagua, mayo a julio 2004-2008.



La Figura representa el número de días con superación de norma, alerta y preemergencia calculados según el promedio móvil de acuerdo a la legislación vigente.

Para efectos de capturar y pronosticar los pocos casos de episodios de contaminación en Rancagua, el periodo se acotó de mayo a julio.

## 5. Pronóstico de episodios de contaminación en Rancagua

El Centro Nacional del Medio Ambiente está desarrollando un sistema operacional de pronóstico diario de episodios de contaminación por MP10 para Rancagua; éste incluye:

- a) La preparación de un pronóstico diario de condiciones meteorológicas asociadas a contaminación atmosférica en Rancagua, entregando un índice denominado Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA).
- b) El desarrollo de un modelo de pronóstico de calidad de aire por MP10, capaz de pronosticar con 24 horas de anticipación los diferentes niveles de calidad de aire.
- c) La incorporación de una opinión experta que de cuenta de la condición esperada y el probable comportamiento espacial y temporal de la masa contaminante.

### 5.1 Estimación de ecuaciones de pronóstico de calidad de aire por MP10

El modelo de pronóstico de calidad de aire para Rancagua, está basado en relaciones estadísticas encontradas mediante regresión lineal múltiple, entre las concentraciones de MP10 esperadas para el día siguiente, las variables de calidad de aire observadas, la meteorología pronosticada y el PMCA pronosticado, entre otros.



Las estimaciones de las ecuaciones de pronóstico de calidad de aire están limitadas a la información de variables meteorológicas pronosticadas disponibles en el modelo dinámico regional ETA.

Las principales actividades realizadas para el desarrollo de las ecuaciones fueron las siguientes:

- Generación de bases de datos de variables meteorológicas y de calidad de aire.
- Análisis de relaciones entre variables predictivas.
- Desarrollo de un modelo de pronóstico (ecuaciones) para un promedio fijo de 24 horas a una cierta hora del día, mediante regresión lineal múltiple.
- Selección de ecuaciones más representativas.

## 5.2 Información utilizada relación atmósfera y calidad de aire

La información utilizada para el pronóstico de condiciones meteorológicas asociadas a contaminación atmosférica por MP10 en Rancagua es la siguiente:

- Índices diarios de PMCA, generados por Cenma para el período de operación del sistema de pronóstico de MP10 Santiago, representativo en casi la totalidad de los casos para Rancagua.
- Información meteorológica de altura para la zona central de Chile, correspondiente al radiosondeo realizado en Santo Domingo, limitada a la información relevante.
- Información meteorológica de superficie y de calidad de aire horaria de la estación de Rancagua, correspondiente a la red SIVICA de MINSAL.
- Información de modelos numéricos del tiempo (cartas de Reanálisis).
- Imágenes sateliticas (resolución visual e IR para Sudamérica).



La información corresponde a valores numéricos e imágenes respaldados en medio digital.

### Bases de datos finales

Las bases de datos finales integran los años 2004 a 2008, período 01 mayo a 31 de julio de cada año.

Los valores de las variables en la base de datos calculados a partir de los valores horarios, se incorporan a la base de datos como valores del día actual (D0), y del día siguiente (D1) y subsiguiente (D2), para lo cual se usa la serie desfasada (+1 y -1 días). El detalle de las variables se presenta a continuación:

### Concentraciones de MP10

A partir de los valores horarios de concentraciones de MP10 medidas en la estación de monitoreo de calidad de aire de Rancagua, se calcularon promedios diarios de 24 horas, obteniéndose:

- Valor de concentración a las 23 horas.
- Concentración promedio de 24 horas (diarios) fijo a las 6 y 18 horas.

MP6D1-6D2	Promedio diario de concentraciones de MP10 entre las 7am del día siguiente y las 6am del día subsiguiente.
MP18D1-18D2	Promedio diario de concentraciones de MP10 entre las 17pm del día siguiente y las 18pm del día subsiguiente.
MP23D2	Valor de concentración de MP10 a las 23 horas de día subsiguiente.



También se contempla la estimación indirecta de las emisiones semanales, utilizando las variaciones semanales de las concentraciones de MP10:

DS16D1	Variación diaria, utilizando promedio diario de concentraciones de MP10 entre las 7am del día siguiente y las 6am del día actual.
--------	---

La información de las concentraciones de MP10 fijo a las 18 horas y el valor de las concentración a las 23 horas, fueron sólo a nivel exploratorio, ya que en la planificación final del diseño de las ecuaciones, se utilizó la concentración de MP10 diario fijo a las 6am, como se especificará más adelante.

### Generación del PMCA

El Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférico PMCA es una medida netamente meteorológica, siendo su valor inversamente proporcional al factor de ventilación (Rutllant y Salinas, 1983), entendiéndose por factor de ventilación el producto del espesor de la capa de mezcla superficial por el viento medio dentro de la capa. El índice da cuenta del potencial de la atmósfera para favorecer la mezcla vertical o para inhibirla.

En este estudio, se determinó como se adaptan las condiciones de ventilación en Rancagua, sobre la base de las tipificaciones de categorías de PMCA para Santiago identificadas por medio de las condiciones meteorológicas observadas a escala sinóptica, regional y local.

Para la clasificación de los PMCA entonces, se estableció la relación del PMCA para Santiago con las concentraciones de MP10 en Rancagua.

Además, para reforzar este análisis, en aquellos casos en que se presentaron altos valores de concentraciones de MP10 en Rancagua, se estudiaron cartas de reanálisis sinóptico de presión superficial y altura geopotencial de 500 hPa promedio.

La justificación de este procedimiento radica en que los movimientos atmosféricos de escala sinóptica modulan en buena medida las condiciones de dispersión, y consecuentemente la calidad del aire. Las configuraciones de escala sinóptica son comunes en las latitudes de Rancagua y Santiago, separados por 90 km aproximadamente, ya que los fenómenos meteorológicos a esta escala se presentan en una longitud horizontal del orden de 1000 km o más.

Las series de tiempo de MP10 y Rancagua indican claramente tendencias comunes con un coeficiente de correlación R2 del orden de 0.54 entre las concentraciones medidas en Pudahuel y Rancagua para el periodo 2004 a 2008.

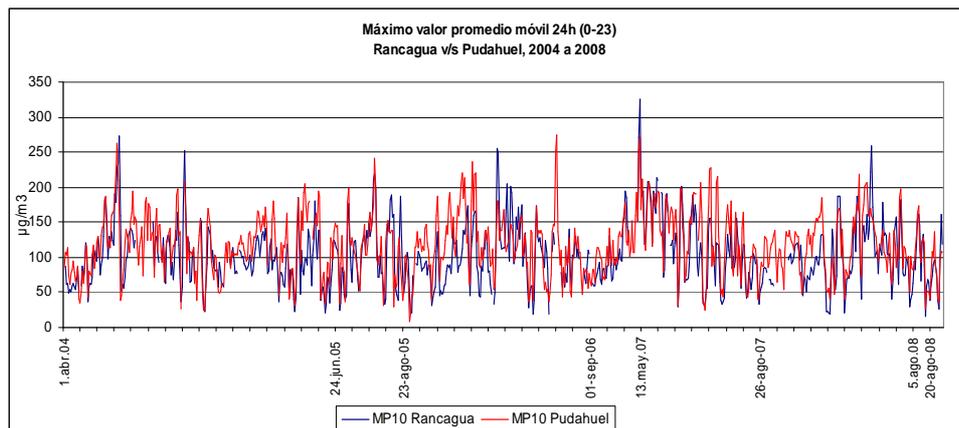


Figura 2 Series de tiempo concentraciones MP10 Rancagua y Pudahuel, 2004 a 2008

Se aprecia gran similitud en las tendencias del MP10 en las estaciones de Rancagua y Pudahuel.

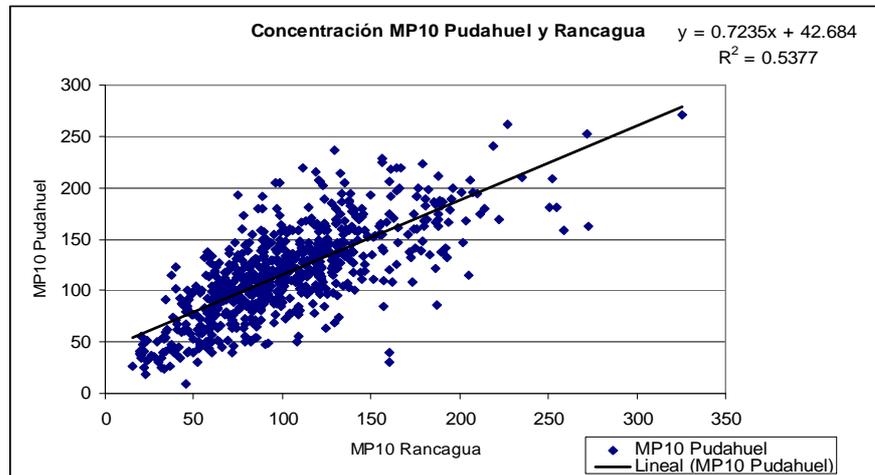


Figura 3 Comparación MP10 (promedios móviles) de Rancagua y Pudahuel, 2004 a 2008.

Se observa buena relación entre las concentraciones observadas en Pudahuel y Rancagua. El R2 es 0.54.

Las categorizaciones de PMCA representativas para Rancagua, se utilizan tomando el pronóstico como perfecto, lo que implica que, al considerar valores pronosticados de esa variable, aumentará la incertidumbre de las ecuaciones de pronóstico de calidad de aire cuando se utilicen en forma operacional.

Definición de Categorías de PMCA:

Categoría PMCA	Condiciones de ventilación y dispersión
1 BAJO	Muy buenas
2 REGULAR BAJO	Buenas
3 REGULAR	Regulares
4 REGULAR/ALTO	Malas
5 ALTO	Críticas

En Anexos se describen y detallan las distintas Categorías de PMCA.



Se ha considerado en la base de datos las estimaciones de PMCA a las 10 y 22 horas. Éstas son:

PMCA10D2	Potencial meteorológico de calidad de aire a las 10 horas, representativo de la primera parte del día. Para el día subsiguiente.
PMCA22D2	Potencial meteorológico de calidad de aire a las 22 horas, representativo de la segunda parte del día. Para el día subsiguiente.
PMCA22D1	Potencial meteorológico de calidad de aire a las 22 horas, representativo de la segunda parte del día. Para el día siguiente.

### Variables meteorológicas de superficie

En el estudio se incorporaron algunas variables derivadas de las mediciones meteorológicas de superficie en Rancagua y variables meteorológicas pronosticadas por el modelo regional ETA.

Las variables son utilizadas a modo de pronóstico perfecto. Por lo que operativamente estas variables aumentarán la incertidumbre de las ecuaciones.

A partir de los valores horarios medidos, se definieron los siguientes valores diarios:

TMXD1	Temperatura máxima en estación Rancagua del día siguiente.
WSMNED1	Intensidad del viento pronosticado por modelo ETA para el día siguiente.
TMXED1	Temperatura máxima pronosticada por modelo ETA para el día siguiente.
HRMNED1	Humedad relativa mínima pronosticada por modelo ETA para el día siguiente.

### Variables meteorológicas de altura

Se utilizan variables obtenidas del radiosondeo de Santo Domingo, perfil 00 UTC y 12 UTC de cada día. En horario de invierno corresponde a las 08 y 20 horas local, respectivamente.



Las variables seleccionadas fueron:

T8500D1	Temperatura en 850hPa a las 00UTC. Para el día siguiente.
T85012D1	Temperatura en 850hPa a las 12UTC. Para el día siguiente.
T85012D2	Temperatura en 850hPa a las 12UTC. Para el día subsiguiente.
DIR50012D1	Dirección del viento en 500hPa a las 12UTC. Para el día siguiente.
DIR50012D2	Dirección del viento en 500hPa a las 12UTC. Para el día subsiguiente.
DIR500D1	Dirección del viento en 500hPa a las 00UTC. Para el día siguiente.

### 5.3 Descripción de la Base de Datos

El detalle de la descripción estadística de la base de datos utilizada se encuentra en Anexos.



## 6. Análisis de relaciones entre las variables utilizadas en el estudio

### 6.1 Análisis de relaciones entre variables de la base de datos inicial

La propuesta de crear modelos para MP10 de promedio día fijo a cierta hora, hace alejarse más de la hora del pronóstico. En este sentido, las variables meteorológicas observadas no son representativas para el pronóstico, mientras que las variables pronosticadas toman mayor protagonismo en la modelación de MP10.

En el caso de este estudio, la información requerida estará limitada a la información de superficie entregada por el modelo dinámico regional ETA.

En este capítulo se presentan los resultados de un análisis de carácter exploratorio, de las relaciones entre variables que integran la base de datos final. Para esto, se utiliza el método de análisis de componentes principales.

### 6.2 Metodología utilizada

Para estudiar comportamientos comunes a diversas variables, se aplicó la metodología de análisis de componentes principales.

El análisis de componentes principales tiende a identificar factores encubiertos, que explican el patrón de correlación dentro de un grupo de variables observadas y pronosticadas. El análisis de componentes principales se usa a menudo en la reducción de datos, pero también puede usarse para generar hipótesis referentes a mecanismos causales, o para estudiar variables para análisis subsecuentes (por ejemplo para identificar colinealidad previa a un análisis de regresión lineal).

Para obtener el análisis de componentes principales de los grupos de datos, se procedió de la siguiente forma:

- Se obtuvo un coeficiente de correlación de la matriz de datos.



- Se realizó la extracción de los factores mediante análisis de la matriz de correlación, útil sólo si las variables son medidas en diferentes escalas.

Se presentan los resultados de las componentes principales, utilizando la base de datos final con las posibles variables predictoras para modelos de MP10 fijo a las 6 de la mañana (MP6D1-6D2).

### 6.3 Resultados del análisis de componentes principales para las posibles variables predictoras para MP10 fijo

Los resultados del análisis de componentes principales con las variables más idóneas para la modelación del promedio día fijo a las 6 de la mañana del período 2004 al 2008, 1 mayo al 31 de Julio son:

- MP10 fijo a las 06 de la mañana

Matriz de componentes

Variables	Componentes		
	1	2	3
MP6D1-6D2	<b>0.67</b>	0.13	-0.55
DS16D1	0.37	0.33	-0.43
PMCA10D2	<b>0.75</b>	-0.36	-0.1
PMCA22D1	<b>0.84</b>	-0.06	-0.19
PMCA22D2	0.56	-0.49	-0.08
TMXED1	<b>0.87</b>	0.31	0.17
HRMNED1	<b>-0.81</b>	-0.01	0.27
WSMNED1	-0.48	0.14	0.52
T8500D1	<b>0.89</b>	0.22	0.3
DIR500D1	-0.25	<b>0.82</b>	-0.17
T85012D2	<b>0.86</b>	-0.06	0.32
DIR50012D2	-0.34	<b>0.74</b>	0.07
T85012D1	<b>0.78</b>	0.4	0.25



DIR50012D1	-0.32	<b>0.63</b>	-0.09
TMXD1	<b>0.67</b>	0.21	0.49

Método de extracción: Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales con las variables que eventualmente podrían participar en la ecuación promedio día fijo a las 6 de la mañana, entrega 3 componentes principales. Estos resultados entregan pautas para seleccionar variables representativas de grupos de variables con comportamientos comunes.

La componente 1, relacionada más fuertemente con el promedio fijo a las 6 de la mañana, PMCA, temperatura y humedad relativa mínima (relación inversa).

La componente 2 se relaciona con la dirección del viento en 500hPa.

La componente 3 no muestra parámetros de interés.

Interpretación del análisis de variables:

- Se aprecia que el MP10 fijo a las 6 de mañana, se correlaciona bien con el PMCA, la temperatura en superficie y altura, y la humedad relativa en superficie, en tanto que la relación es menor con la velocidad del viento y la variación semanal de MP10.

#### 6.4 Análisis de relaciones entre concentraciones de MP10 y variables meteorológicas

Además del análisis de componentes principales es necesario entender el comportamiento de las concentraciones de MP10 respecto a las variables meteorológicas.

Debido a la baja cantidad de episodios en la zona de Rancagua, al usar la totalidad de información del período otoño e invierno no se alcanzan a apreciar altas correlaciones entre el MP10 y la meteorología. Sin embargo, al comparar los episodios de altas concentraciones de MP10 de Rancagua respecto a Santiago, la mayoría de

los casos son coincidentes, es decir, los eventos suscitados en Rancagua también se presentaron en Santiago, denotando que el efecto de la condición de gran escala o sinóptica siguen un mismo patrón. Lo comentado anteriormente se puede apreciar con mayor detalle a continuación.

En las figuras siguientes se aprecian los días de coincidencia de los eventos en ambas ciudades. Se logra identificar que en Rancagua, tanto las configuraciones tipo A como BPF, afectan a esta zona con condiciones de malas ventilación, al igual que en Santiago. Además, los días sin coincidencia se relacionan con altas concentraciones de MP10 en Santiago a excepción de un par de casos.

El Total corresponde a eventos en Santiago, mientras que los casos No coincidentes corresponden a eventos producidos en Rancagua y no en Santiago.

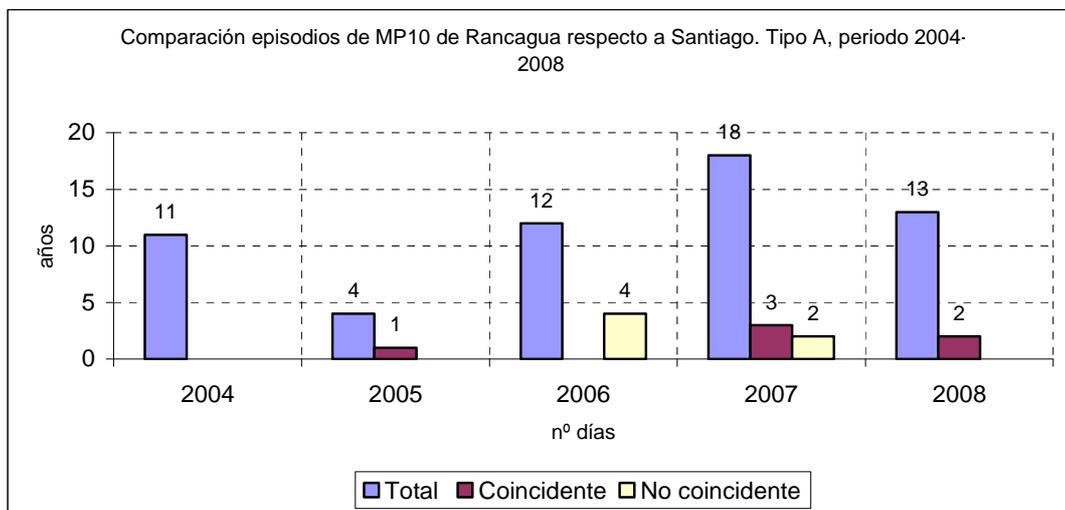


Figura 4 Comparación de los eventos Tipo A en niveles de Alerta y Preemergencia en Rancagua respecto a los eventos observados en Santiago

Los episodios Tipo A, que dan cuenta de aproximadamente al 70% de los episodios observados en Santiago, también se observan en Rancagua.

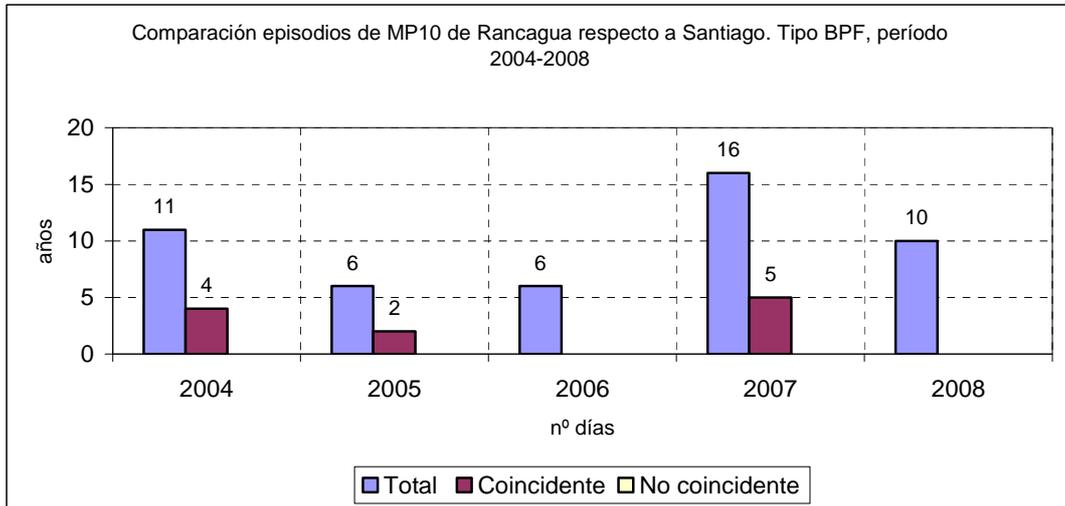


Figura 5 Comparación de los eventos Tipo BPF en niveles de Alerta y Preemergencia en Rancagua respecto a los eventos observados en Santiago

Los episodios tipo BPF, que dan cuenta de aproximadamente un 30% de los casos en Santiago, también se observan en Rancagua, aunque en menor número.

Ver definiciones de episodios Tipo A y BPF en Anexos.

Existe además, una buena relación entre las concentraciones de MP10 en Rancagua y las categorías de PMCA ajustadas para Rancagua.

En la Figura siguiente se distingue a grandes rasgos, que las categorías más altas de PMCA (PMCA 4 y 5) asociadas a configuraciones meteorológicas favorables a episodio, se relacionan razonablemente bien con el aumento de las concentraciones de MP10.

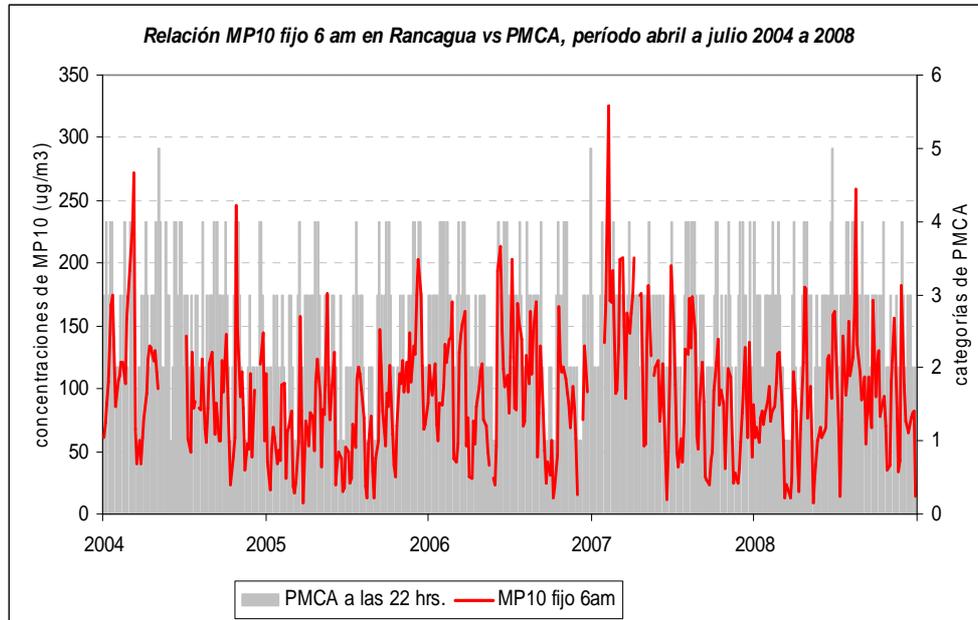


Figura 6 Relación de las concentraciones de MP10 de Rancagua y las categorías de PMCA

En general, los PMCA 1, 2 y 3 coinciden con los niveles más bajos de concentraciones de Mp10, en este caso, considerando promedios fijos 6 a 6. Los eventos más extremos de contaminación (preemergencia) están estrechamente relacionados con PMCA 4 o 5.



## 7. Ecuaciones de pronóstico para concentraciones de MP10 mediante regresión lineal múltiple

Se desarrollaron ecuaciones de pronóstico para concentraciones de MP10 diario fijo a cierta hora, eligiéndose finalmente, el valor diario promedio entre las 7 del día siguiente al pronóstico y las 6 horas del día subsiguiente.

### Metodología Utilizada

Se ajustaron ecuaciones de pronóstico para concentraciones de MP10 fijo a las 6 horas, mediante análisis de regresión lineal múltiple, con variables meteorológicas pronosticadas en superficie del modelo ETA, variables meteorológicas observadas de superficie y de altura del radiosondeo de Santo Domingo como pronóstico perfecto, PMCA observado como pronóstico perfecto, variación de las emisiones de MP10 considerando el ciclo semanal, todas variables incorporadas en la base de datos inicial.

Las ecuaciones obtenidas son del tipo:

$$Y_{ss} = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3 + \dots$$

Donde,

$Y_{ss}$  es el valor estimado de concentraciones para la estación ss.

$B_0$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  son las constantes estimadas en la regresión para  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ , variables explicativas seleccionadas en el método de regresión.

El método de regresión múltiple de tipo "forward", empieza incorporando a la ecuación de regresión la variable que tiene la correlación parcial más fuerte (positiva o negativa) con la variable a predecir. En cada paso, se incorpora la variable siguiente con la correlación parcial más fuerte. El proceso de incorporación de variables se detiene cuando la correlación parcial deja de ser significativa.



Otro método que entrega resultados muy parecidos a "forward", es "stepwise". En este caso, al incorporar una nueva variable en un paso, se puede eliminar otra variable seleccionada antes, si ha perdido significancia al agregar la variable nueva. Las pruebas realizadas con ambos métodos entregaron resultados muy parecidos.

El método "backward" es similar, pero en este caso se incorporan en el primer paso todas las variables, y luego se van eliminando una a una. Usualmente ambos métodos deberían converger a la misma solución. En este caso, debido al gran número de variables que incluye la base de datos, el método "backward" no es práctico de aplicar.

Las ecuaciones presentadas son las encontradas en el paso final del ajuste de regresión múltiple usando el método "stepwise".

El método de regresión lineal múltiple usará la información de la base de datos detalladas anteriormente, del período entre Mayo a Julio de los años 2004 al 2007. La ecuación será validada con el período Mayo a Julio del año 2008.

Para este análisis, en el primer intento de ajuste de ecuaciones de pronóstico, se consideraron todas las variables de la base de datos. En seguida se va probando hasta llegar a una ecuación con el máximo coeficiente de correlación posible, teniendo en cuenta el análisis de componentes principales previo, y el índice de colinealidad de las variables involucradas en la ecuación.



La idea de crear ecuaciones de promedio fijo de 24 horas, obedece al propósito de evitar la inercia del promedio móvil de 24 horas. Esta inercia determina un desfase al inicio y término de los episodios ocultando el real período de empeoramiento relacionado con los valores horarios de MP10. El máximo típicamente aparece al día siguiente, cuando el episodio ha terminado.

Para ejemplificar de mejor manera lo mencionado en el párrafo anterior, se analiza un episodio ocurrido en el año 2007.

Referenciado a los promedios móviles (línea rosada), se aprecia que el evento dura gran parte del día D2 con concentraciones de MP10 que alcanzan niveles de episodios. Sin embargo, las reales horas de empeoramiento en cuanto a las concentraciones, son las manifestadas por los valores horarios (línea azul), las cuales se presentan principalmente en la noche del día D1 y madrugada del día D2.

El desfase asociado al promedio móvil determina que no queden reflejados tanto el empeoramiento en la noche del día D1 y la mejoría durante la mañana y tarde del día D2. De hecho, la inercia de este indicador hace que el valor máximo del período se registre el día D2, cuando en realidad los valores más altos se registran en la noche del día D1 y madrugada del día D2.

Si en lugar del promedio móvil de 24 horas se considera el promedio fijo de 24 horas, como la media observada entre 7 am del día D1 y 6 am del día D2 (puntos rojos), queda mejor representada la hora en que se desarrollan los episodios, considerando los pics diurno y nocturno traducidos en un solo valor día. Se evita así el problema de arrastre por inercia y de doble conteo generado por el promedio móvil de 24 horas. Además, el promedio de 7 am a 6 am de la mañana tiene la particularidad de anticiparse en un mayor número de horas al período que se quiere pronosticar.

En el sistema de pronóstico actual, el esquema de proyección considera que durante el día actual (D0), se prevea el máximo valor del promedio móvil de 24 horas entre las

0 y las 23 horas del día siguiente (D1), promedio móvil que en sí, integra valores tanto del día D0 como del día D1. A diferencia de esto, el nuevo sistema formulado, propone que durante el día D0 se pronostique un solo valor que represente el pic completo (válido para la toma de medidas del día D1) y que termina el día subsiguiente (D2) a las 6 am.

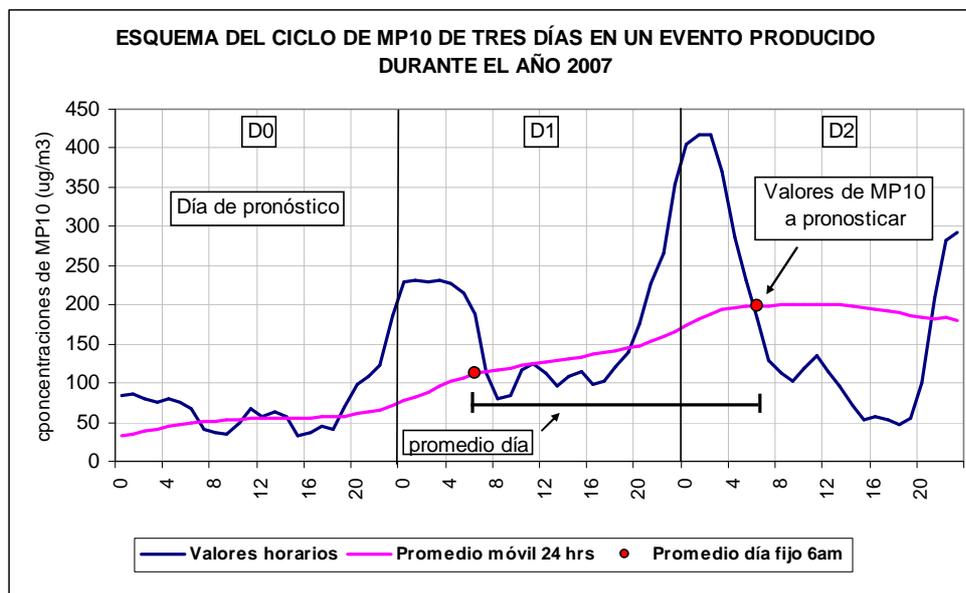


Figura 7 Comportamiento del MP10 durante un episodio crítico ocurrido en Rancagua año 2007

Los antecedentes técnicos del uso de promedios fijos de 6 a 6 están basados en el ciclo diario del MP10. En estudio de Evaluación de los modelos de pronóstico de MP10 en uso en la RM realizado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile en Marzo 2007 se recomendó: "Para eliminar la incoherencia (del ICAP como pronóstico de variable con características de diagnóstico) sería lógico establecer un valor por día que representa un promedio de 24 horas. Para este periodo de 24 horas se sugiere el periodo de 6 horas del día siguiente a las 6 horas del día subsiguiente por la siguiente razón: las emisiones tienen un ciclo diario. Dentro de este ciclo los valores más bajos (de emisiones) se encuentran entre la medianoche y las 6 horas de la mañana. Sin embargo, en caso



de episodios, las concentraciones pueden seguir teniendo valores altos hasta la madrugada. En consecuencia, dada la ausencia de las emisiones (o valores muy bajos) entre la medianoche y las 6 horas de la mañana, esas concentraciones son producto de las emisiones del día anterior. Recién, con el aumento de las emisiones a partir de las 6 horas de la mañana, la actividad antropogénica del día actual tiene un impacto significativo en la contaminación atmosférica. Es decir, el impacto principal de las emisiones de un día es de las 6 horas del día actual hasta las 6 horas del día siguiente. En términos de pronóstico, eso significa que el promedio de 24 horas pronosticado debería ser entre las 6 horas del día siguiente, hasta las 6 horas del día subsiguiente".

Una dificultad para elaborar el pronóstico del valor medio del día fijado a la 6 de la mañana del día sub-siguiente (D2), es que las variables diagnósticas del día presente (D0) en general no tienen necesariamente relación con el promedio de MP10 entre las 7 del día siguiente (D1) y 6 del día sub-siguiente (D2). Debido a esto, las variables de entrada a la ecuación de regresión utilizadas corresponden a variables de superficie pronosticadas (24 horas de anticipación), disponibles del modelo regional ETA, que por ser pronosticadas, podrían amplificar los errores del resultado de la modelación.

### **Metodología de Evaluación Utilizada**

Para la evaluación de las ecuaciones se definen 4 niveles de contaminación:

Bueno (1), Regular (2), Malo (3) y Muy Malo (4).

Tal clasificación fue elaborada en base a la norma de calidad primaria para material particulado respirable en Santiago (D.S N°59), pero sin contemplar promedios móviles sino fijos de 6 a 6. Por tal motivo, para nuevos ajustes de las ecuaciones, se intentará modificar los límites de evaluación, ya que en ocasiones el nivel de MP10 alcanzado a las 6 am puede no indicar el estado real de las concentraciones de 24 horas (resto del día).



La evaluación se realizará por medio de tablas de contingencia (o de clasificación cruzada) que entregan estadísticos usados para evaluar la capacidad predictiva de cada ecuación, comparando categorías de MP10 observado con lo pronosticado durante el periodo de evaluación (Mayo a Julio 2008), según los umbrales indicados más abajo.

Como la base de datos para ciertas variables no es completa, el número de casos disponibles para cada ecuación es variable. Además, teniendo en cuenta que las ecuaciones consideran diversas variables, el número de días simultáneos puede disminuir significativamente en algunas ecuaciones.

Las categorías de calidad del aire en base a promedios fijos de 6 a 6 son:

Nivel Bueno: menor a  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Nivel Regular: entre 150 y  $194 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Nivel Malo: entre 195 y  $239 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Nivel Muy Malo: superior a  $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$



## Resultados ecuaciones de pronóstico considerando promedios de MP10 fijos 6 a 6

En esta sección se muestran las ecuaciones encontradas para la estación de Rancagua, utilizando el método de regresión lineal múltiple, además de los ajustes realizados a las ecuaciones originales para los valores extremos.

### Ecuación predictiva N°1

$$MP6D1-6D2=13.143+19.27PMCA22D1+0.38DS16D1+3.090TMXD1+4.78T8500D1-3.309T85012D2+ 8.92PMCA10D2$$

Donde,

MP6D1-6D2	Promedio diario de concentraciones de MP10 entre las 7am del día siguiente y las 6am del día subsiguiente.
PMCA22D1	Potencial meteorológico de calidad de aire a las 22 horas, representativo de la segunda parte del día. Para el día siguiente.
DS16D1	Variación diaria, utilizando promedio diario de concentraciones de MP10 entre las 7am del día siguiente y las 6am del día actual.
TMXD1	Temperatura máxima en estación Rancagua del día siguiente.
T8500D1	Temperatura en 850hPa a las 00UTC. Para el día siguiente.
T85012D2	Temperatura en 850hPa a las 12UTC. Para el día subsiguiente.
PMCA10D2	Potencial meteorológico de calidad de aire a las 10 horas, representativo de la primera parte del día. Para el día subsiguiente.

Los resultados de la primera ecuación ajustada para Rancagua se muestran en la tabla de contingencia siguiente.

La evaluación incluye el Porcentaje de Acierto, el Porcentaje de Episodios No Alertados (ENA) y el Porcentaje de Falsas Alarmas (FA). El ENA corresponde a la fracción de casos en que habiéndose pronosticado Bueno, se observó un Nivel



Desarrollo de un sistema de pronóstico  
para la ciudad de Rancagua

Regular, Malo o Muy Malo respecto del total de casos en que se observó Nivel Regular, Malo o Muy Malo.

FA representa el cociente entre el número de casos en que habiéndose observado el Nivel Bueno, se pronosticó Nivel Regular, Malo o Muy Malo y el total de casos en que se pronosticó Nivel Regular, Malo o Muy Malo.

MP246D1-6D2	Observado					
	Bueno	Regular	Malo	Muy malo	Total	% Acierto
P6D1-6D2 (1er)						
Bueno	67	7	0	0	74	90,5
Regular	1	1	0	1	3	33,3
Malo	0	0	0	0	0	-----
Muy malo	0	0	0	0	0	-----
Total	68	8	0	1	77	
%Acierto	98,5	12,5	-----	0,0		
N° Aciertos	76					
%Acierto Total	98,7					
ENA	77,8					
FA	33,3					

Aunque el porcentaje de acierto total es bastante alto, la ecuación subestima los valores extremos. Las FA tienen un porcentaje razonable.

Como la cantidad de episodios de MP10 en Rancagua fue bastante reducida el 2008 (ya que se consideró una nueva modalidad para definir un evento), y en general en el resto del periodo, se definió el nivel de episodio para las concentraciones desde la categoría Regular, es así como se contabilizan 9 eventos el 2008.



Desarrollo de un sistema de pronóstico para la ciudad de Rancagua

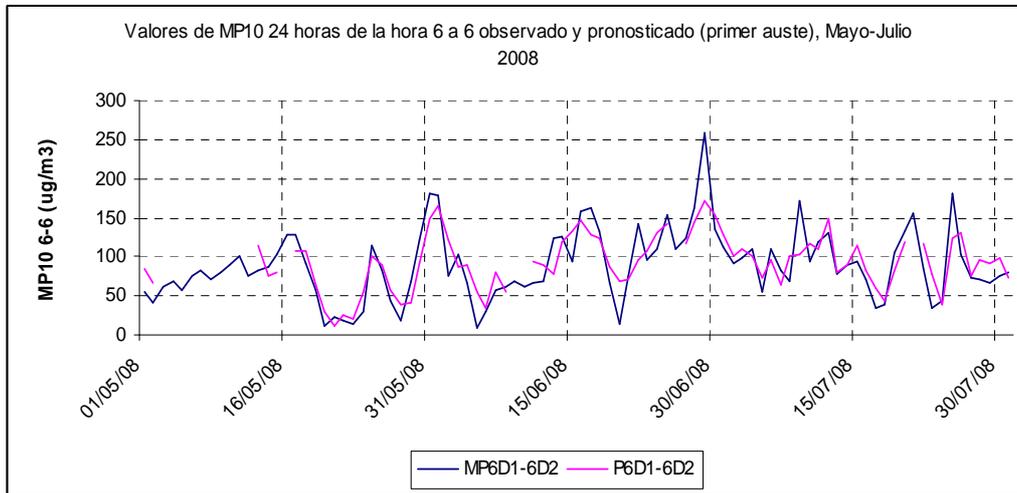


Figura 8 Verificación del primer ajuste del pronóstico del valor medio entre las 6 de la mañana del día siguiente y las 6 de la mañana del día subsiguiente.

La figura muestra que la serie de valores pronosticados sigue bastante bien las tendencias de los valores observados, pero subpronostica los máximos.

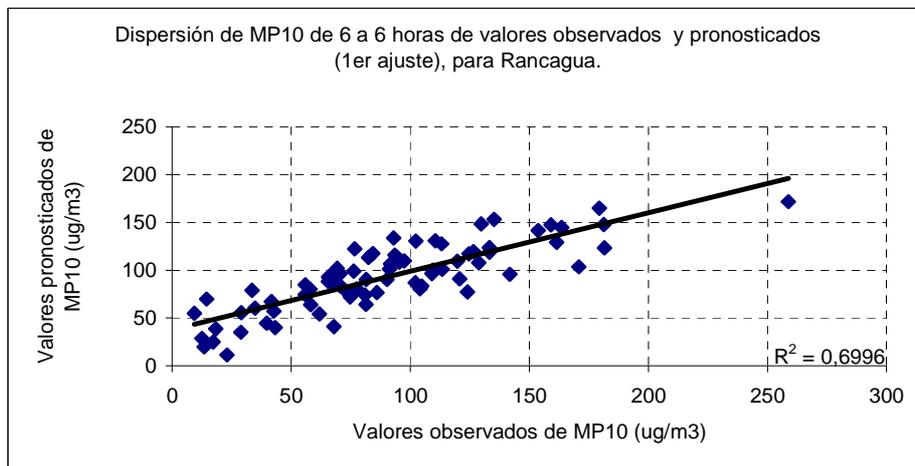


Figura 9 Ajuste lineal entre el valor observado de MP10 y el primer ajuste pronosticado del promedio 6 a 6



La nube de puntos se concentra principalmente entre los 50 y 140 ug/m<sup>3</sup>, observándose mayor dispersión en el caso de los valores más altos. El evento observado en nivel crítico sólo se captura como nivel Regular.

### Ecuación predictiva N°2 (alternativa):

Esta ecuación considera sólo 3 variables predictivas de fácil obtención y simple implementación. En caso de no contar con toda la información que requiere la Ecuación N°1, esta ecuación asegura la obtención de un pronóstico alternativo.

$$MP6D1-6D2 = -21.46 + 22.03PMCA22D1 + 0.45DS16D1 + 5.63PMCA10D2$$

Donde,

MP6D1-6D2	Promedio diario de concentraciones de MP10 entre las 7am del día siguiente y las 6am del día subsiguiente.
PMCA22D1	Potencial meteorológico de calidad de aire a las 22 horas, representativo de la segunda parte del día. Para el día siguiente.
DS16D1	Variación diaria, utilizando promedio diario de concentraciones de MP10 entre las 7am del día siguiente y las 6am del día actual.
PMCA10D2	Potencial meteorológico de calidad de aire a las 10 horas, representativo de la primera parte del día. Para el día subsiguiente.

Los resultados para esta segunda ecuación se muestran en la tabla de contingencia siguiente:

MP246D1-6D2	Observado					
	Bueno	Regular	Malo	Muy malo	Total	% Acierto
P6D1-6D2 (2do)						
Bueno	81	6	0	0	87	93,1
Regular	1	3	0	1	5	60,0
Malo	0	0	0	0	0	-----
Muy malo	0	0	0	0	0	-----
Total	82	9	0	1	92	
%Acierto	98,8	33,3	-----			
N° Aciertos	76					
%Acierto Total	98,7					
ENA	60,0					
FA	20,0					

Para esta ecuación, el porcentaje de acierto es idéntico al obtenido en la Ecuación N° 1, e incluso mejora el porcentaje de ENA y FA. Sin embargo, también subpronostica los niveles máximos.

La serie de verificación de la ecuación se muestra a continuación:

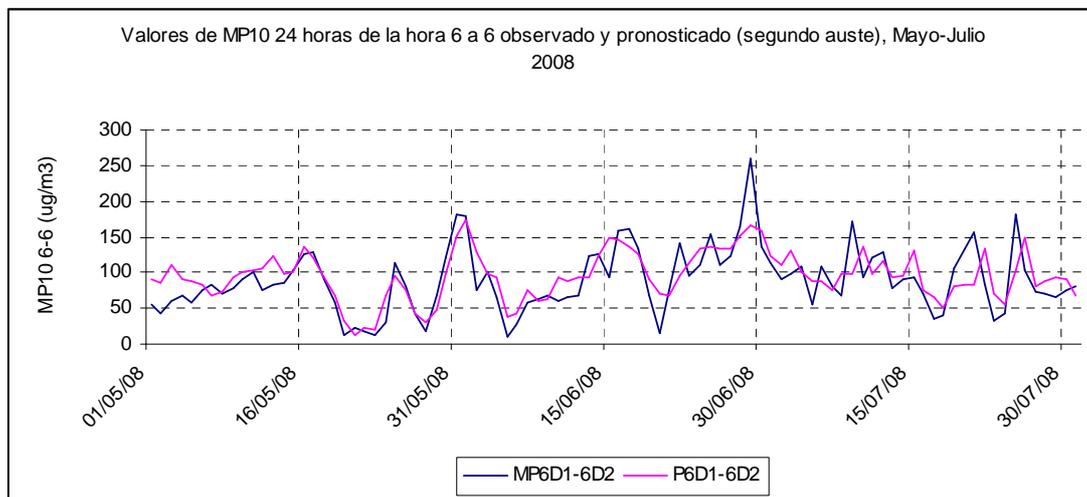


Figura 10 Verificación de la segunda ecuación, pronóstico del valor promedio entre las 6 de la mañana del día siguiente y las 6 de la mañana del día subsiguiente.



Al igual que la ecuación anterior, se observa en general, buena correspondencia entre valores de MP10 observados y pronosticados. Pero, el evento más intenso no es capturado completamente.

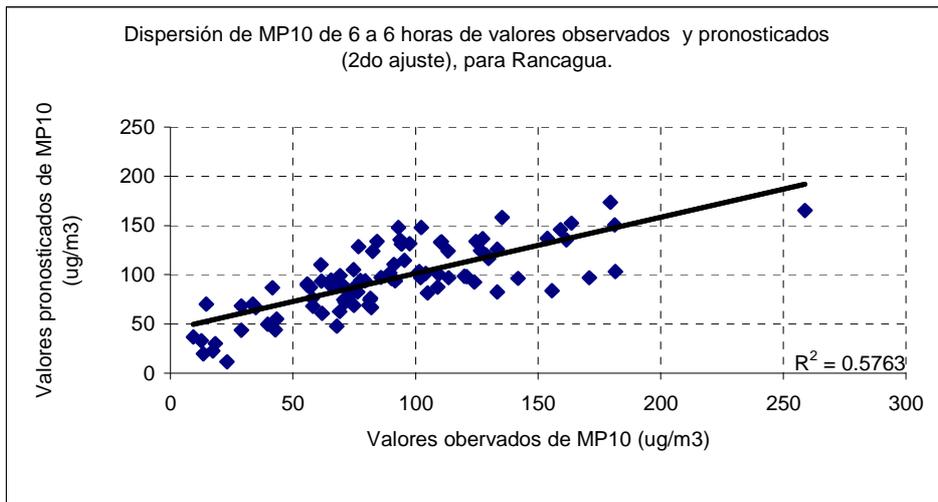


Figura 11 Ajuste lineal entre el valor observado de MP10 y la segunda ecuación de pronóstico promedio 6 a 6

En este caso, el gráfico muestra mayor dispersión en valores sobre 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Como las ecuaciones tienden a subestimar los episodios de mayor contaminación, se efectuó un ajuste para los valores extremos en la Ecuación N° 1, incorporando el error criterio.

**Ecuación predictiva N° 1 (incorporando el error criterio):**

Para esta ecuación se realiza un ajuste a los valores extremos de MP10, utilizando el denominado "error criterio" que corresponde a la diferencia media absoluta entre el valor observado y pronosticado de MP10, para aquellos días en que la humedad relativa mínima pronosticada por el modelo ETA para el día siguiente sea menor a 20%



Desarrollo de un sistema de pronóstico  
para la ciudad de Rancagua

y el PMCA esperado para el día subsiguiente sea 4 o 5. En estos casos, al valor entregado por el modelo se adiciona  $48,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

$$\text{MP6D1-6D2} = 13.143 + 19.27\text{PMCA22D1} + 0.38\text{DS16D1} + 3.090\text{TMXD1} + 4.78\text{T8500D1} - 3.309\text{T85012D2} + 8.92\text{PMCA10D2}$$

**Error criterio: Si  $\text{HRMNED1} < 20\%$  y  $\text{PMCA10D2} \geq 4$ , entonces adicione al valor pronosticado  $48,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .**

Donde,

MP6D1-6D2	Promedio diario de concentraciones de MP10 entre las 7am del día siguiente y las 6am del día subsiguiente.
PMCA22D1	Potencial meteorológico de calidad de aire a las 22 horas, representativo de la segunda parte del día. Para el día siguiente.
DS16D1	Variación diaria, utilizando promedio diario de concentraciones de MP10 entre las 7am del día siguiente y las 6am del día actual.
TMXD1	Temperatura máxima en estación Rancagua del día siguiente.
T8500D1	Temperatura en 850hPa a las 00UTC. Para el día siguiente.
T85012D2	Temperatura en 850hPa a las 12UTC. Para el día subsiguiente.
PMCA10D2	Potencial meteorológico de calidad de aire a las 10 horas, representativo de la primera parte del día. Para el día subsiguiente.

Los resultados de la primera ecuación para Rancagua, incluyendo el error criterio, se presentan en la siguiente tabla de contingencia:

MP246D1-6D2	Observado						
	P6D1-6D2 (1er+E)	Bueno	Regular	Malo	Muy malo	Total	% Acierto
Bueno		63	2	0	0	65	96.9
Regular		5	3	0	0	8	37.5
Malo		0	3	0	1	4	0.0
Muy malo		0	0	0	0	0	-----
Total		68	8	0	1	77	
%Acierto		92.6	37.5	-----	0.0		
Nº Aciertos		76					
%Acierto Total		98.7					
ENA		22.2					
FA		41.7					

El acierto total se mantiene en 98,7%, lográndose un claro mejoramiento en la detección de episodios, ya que ENA alcanza sólo un 20%. Aunque aumenta el porcentaje de FA, éstas derivan de niveles pronosticados como Regular y observado Bueno.

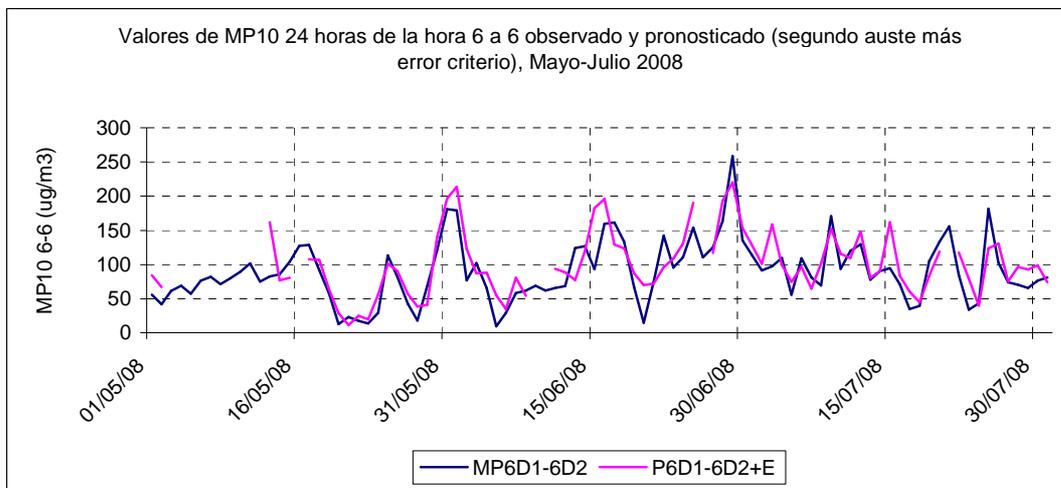


Figura 12 Verificación de la primera ecuación considerando el error criterio, pronóstico del valor promedio entre las 6 de la mañana del día siguiente y las 6 de la mañana del día subsiguiente.

La figura muestra buena correspondencia entre valores de MP10 observados y pronosticados y un mejor acierto en los valores máximos de MP10.

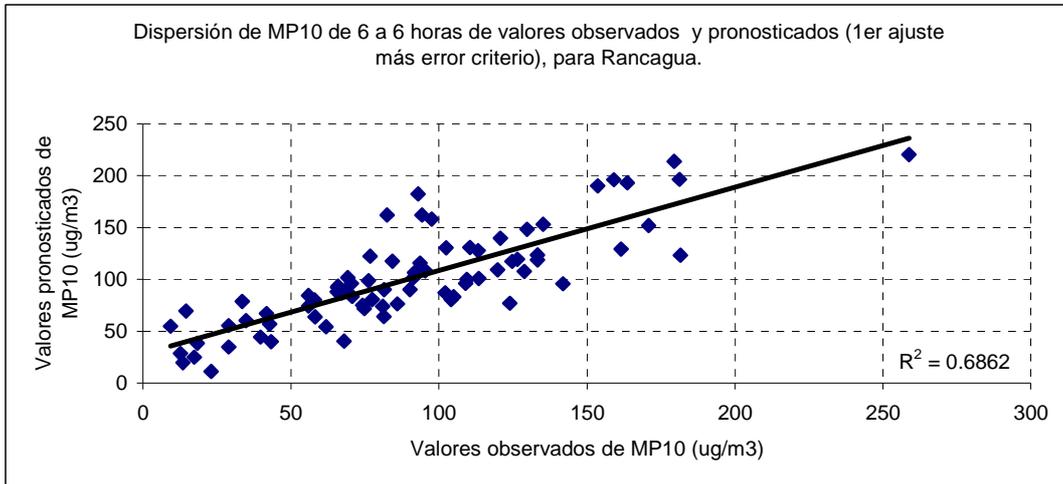


Figura 13 Ajuste lineal entre el valor observado de MP10 y la primera ecuación pronóstico 6 a 6 considerando el error criterio

Aunque el  $R^2$  es ligeramente menor a la ecuación N° 1 sin ajuste, existe mayor coincidencia entre los valores observados y pronosticados de MP10 extremo, niveles de mayor relevancia en este tipo de pronóstico.



## 8. Conclusiones y Discusión

### Fase 1 del proyecto: Desarrollo de un modelo de pronóstico MP10 para Rancagua

- Se realizó un estudio de las condiciones meteorológicas asociadas a distintos niveles de calidad de aire por MP10 en la región, creando una base de datos robusta que integra variables atmosféricas de superficie y altura y de calidad del aire, generando además un indicador de las condiciones de ventilación para el periodo de estudio, y realizando un análisis para ver las relaciones entre las variables. Como era esperable, se apreció una fuerte relación entre la ocurrencia de episodios en Santiago respecto a Rancagua. Los factores de gran escala y sinóptica que inciden en la generación de malas condiciones de ventilación son comunes en ambas ciudades. Debido a esto, se pudo ajustar la categorización de PMCA de Santiago a Rancagua.
- Se eligió el desarrollo de un modelo de tipo estadístico, como es el de regresión lineal múltiple, debido a sus características de aplicación directa en el pronóstico, de fácil interpretación, bajo costo y simple implementación.
- El Modelo de calidad del aire en esta primera etapa, incluirá ecuaciones de pronóstico sólo aplicables a la ciudad de Rancagua, debido a que en la actualidad, es la única que cumple con los requisitos necesarios para desarrollar este tipo de modelación. La información generada por las estaciones de Rengo y San Fernando podrá ser utilizada e incorporada en el modelo de calidad de aire cumplidos 3 años con información validada. Acabado el periodo de episodios 2010, la información generada en estas dos estaciones, podrá ser utilizada para desarrollar ecuaciones de pronóstico, cuya implementación se proyecta para el otoño invierno 2011.
- Para efecto de la representatividad de las ecuaciones de pronóstico se optó por trabajar en base a promedios fijos de 24 horas, para evitar el problema de arrastre por inercia y de doble conteo de los episodios generado por el



promedio móvil de 24 horas usado actualmente. Las ecuaciones de pronóstico están basadas en promedios fijos de 6 a 6.

- Los niveles de calidad de aire en base a promedios diarios 6 a 6 serán:  
Bueno: menor a  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$   
Regular: entre 150 y  $194 \mu\text{g}/\text{m}^3$   
Malo: entre 195 y  $239 \mu\text{g}/\text{m}^3$   
Muy Malo: superior a  $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Debido a la baja cantidad de episodios en el nivel Malo y Muy Malo observados en Rancagua, se optó por clasificar un día de episodio cuando se alcanza o supera el nivel Regular. Esta forma de definir un evento de contaminación lo aplica también CONAMA Araucanía.
- El análisis de componentes principales mostró que el MP10 fijo a las 6 am se correlaciona bien con el PMCA, la temperatura en superficie y altura, y la humedad relativa en superficie (relación inversa). La relación es menor con la velocidad del viento y la variación semanal del MP10.
- Se desarrollaron varias ecuaciones de pronóstico mediante regresión lineal múltiple, seleccionándose tres.

La primera ecuación utiliza como variables predictivas el PMCA, la variación diaria del MP10, la temperatura máxima en superficie y temperaturas en el nivel de 850 hPa.

Esta primera ecuación incorpora además un ajuste por error criterio,  $48.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , que se adicionará al resultado preliminar en caso de preverse eventos extremos, lo que estará condicionado a valores de humedad relativa mínima y PMCA esperado para el día subsiguiente.

También se contará con una ecuación alternativa en caso de no contar con toda la información que se requiere para ejecutar la primera ecuación. Las variables incluidas en esta ecuación son el PMCA y la variación diaria.

- Aunque hasta el momento estas ecuaciones son las más representativas, durante el periodo 2010 se realizarán nuevos ajustes y mejoras.



## Fase 2 del proyecto: Implementación y operación sistema de pronóstico para Rancagua

- Se han desarrollado fortalezas en el diseño y operación de un sistema de pronóstico en CENMA, por lo que la metodología, los procedimientos de control, la implementación de sistemas de turnos rotativos (a fin de llevar a cabo el adecuado seguimiento y discusión técnica requeridos por el sistema de pronóstico), están adecuadamente consolidados. Además, se ha avanzado en el proceso de Implementación de la Norma ISO 9001 como respuesta a la necesidad de desarrollar Sistemas de Gestión y Control para optimizar las metodologías que permitan alcanzar los objetivos y metas desarrolladas en cada proyecto, y se concluye que la operación de los sistemas de pronósticos por parte de CENMA en otras regiones (RM, Araucanía) son perfectamente aplicables y adaptables al pronóstico de calidad de aire específico para Rancagua. La puesta en marcha del sistema se proyecta para mediados de marzo de 2010, con envío de pronósticos diarios oficiales a CONAMA VI región a partir del 01 de abril, extendiéndose probablemente hasta mediados de septiembre de 2010 u otra fecha a definir con la contraparte.
- Aplicabilidad del pronóstico. Para la implementación de un plan adecuado ante episodios críticos es necesario considerar la implementación de un modelo de calidad del aire, la aplicación de medidas de mitigación del MP10 y la entrega de información y recomendaciones a la población.  
Para el caso específico de Rancagua, en donde la cantidad de eventos aún es escaso, CENMA recomienda que el sistema de pronóstico de calidad de aire sea aplicable como una herramienta de prevención e información a la población, y no necesariamente asociada a medidas de mitigación por parte de la autoridad competente.  
Recomendaciones a la población. Una de las características de este tipo de modelo de pronóstico estadístico es que contempla una ecuación de



pronóstico para cada estación. Es decir, que el modelo pronosticará un valor máximo de concentración para una estación (Rancagua) con sus ecuaciones respectivas. Sin embargo, en base a la tipificación de las condiciones meteorológicas que inciden en la calidad del aire de Rancagua, existe conocimiento del comportamiento espacial y temporal del MP10. Por ejemplo, Episodios Tipo A (en fase vaguada costera en superficie y dorsal en altura) que explican un gran porcentaje de los episodios observados en Rancagua, relacionan estabilidad y vientos predominantes de componente Este que generan un transporte de los contaminantes hacia el poniente de la ciudad, cuya mayor concentración se observa durante la noche y primeras horas de la madrugada.

En base a lo anterior, se puede proyectar indirectamente el comportamiento espacial y temporal del MP10, incorporado recomendaciones en base al tipo de evento esperado.

En base a la metodología utilizada en CONAMA Araucanía y a los niveles de calidad de aire alcanzados en Rancagua, CENMA puede cooperar en la propuesta de recomendaciones a la ciudadanía en términos de salud, uso de artefactos de calefacción domiciliaria u otros.

- Se enviarán dos informes diarios, uno matutino (reporte preliminar) y otro vespertino (reporte definitivo), que darán cuenta de las condiciones meteorológicas y de calidad de aire observadas y pronosticadas. (Ver contenido en Anexos).
- Luego del seguimiento diario y continuo de las condiciones meteorológicas y de calidad del aire, y la obtención del resultado del modelo de pronóstico, la información será analizada y sometida a juicio informado para luego elaborar finalmente una opinión experta que de cuenta de la condición de calidad del aire esperada. Este resultado se incluirá en el reporte definitivo del día.
- El traspaso de información (pronósticos), se hará de acuerdo a los procedimientos internos, lo cuales serán presentados oportunamente a la contraparte para sus observaciones y coordinación.



- Los informes que den cuenta de la operación del sistema de pronóstico, la evaluación de las herramientas de pronóstico, el análisis de episodios y el análisis crítico del sistema serán presentados a la contraparte para definir contenido, periodicidad y formato.
- Se sugiere a la contraparte planificar un seminario de cierre de proyecto fase 1 y presentación de la segunda fase de implementación y operación del sistema, en donde CENMA exponga los resultados obtenidos del desarrollo del sistema de pronóstico, y se tomen conjuntamente las decisiones en cuanto a la coordinación durante el periodo de gestión de episodios críticos y la aplicabilidad de la información generada por el sistema de pronóstico.

## 9. Anexos

### Definición de Episodios Tipo A y BPF que afectan a Rancagua

El valle de Rancagua presenta patrones meteorológicos de transición entre las condiciones áridas de la zona norte y la alta pluviosidad de la zona sur, lo que se traduce en marcadas variaciones de temperatura y precipitación entre las estaciones de otoño-invierno y primavera-verano.

Es sabido que las condiciones de ventilación y dispersión de los contaminantes dependen de las diferentes configuraciones meteorológicas que a escala sinóptica, regional y local evolucionan en la zona central, potenciadas por cierto, por su topografía.

Existe una definición de configuraciones meteorológicas clásicas asociadas a episodios de contaminación atmosférica (1994, J Rutilant) en otoño e invierno. Aunque estas fueron desarrolladas para la ciudad de Santiago, son absolutamente aplicables a Rancagua como se mencionó con anterioridad.

Las configuraciones meteorológicas asociadas a episodios de contaminación atmosférica se definen como Tipo A, BPF o Mixtas.



### **Configuración Tipo A**

Está caracterizada por la irrupción de una dorsal en la troposfera media (flujo de aire descendente al nivel de 500 hPa) y la formación de un centro de baja presión costera a niveles bajos, que se propaga de norte a sur entre el sistema de alta presión subtropical por el oeste, y una alta presión fría migratoria que se desplaza al este de la cordillera de Los Andes.

La baja costera produce descenso de aire (subsistencia forzada) en la ladera andina occidental y vientos de dirección este, generados por aglomeración de aire (convergencia superficial) en el sector delantero de la baja presión.

A esta configuración se asocia la presencia de cielos despejados, anomalías negativas de la humedad relativa, y positivas de temperatura, intensificación de la inversión térmica debida a la subsistencia atmosférica, reducción de la capa de mezcla superficial y por tanto, bajo factor de ventilación.

### **Configuración de tipo BPF**

A diferencia del episodio A, la configuración tipo BPF se genera por la irrupción de una vaguada en altura (flujo de aire ascendente en la troposfera media) que acompaña a una sistema frontal débil u ocluido, que pierde energía a medida que se aproxima al continente.

Esta condición está asociada a abundante cobertura nubosa prefrontal del tipo media y alta, y bajo factor de ventilación.

### **Episodios Mixtos**

Ocurren cuando se alternan los episodios de tipo A y BPF con períodos intermedios del orden de 24 horas. Generalmente los episodios mixtos comienzan con una configuración del Tipo A seguida de una Tipo BPF.



## Definición Categorías PMCA para Rancagua basado en la clasificación realizada para Santiago

Para efectos operacionales, y sobre la base de las condiciones observadas y analizadas, CENMA efectuó una tipificación de condiciones sinópticas asociadas a distintos valores de Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA). Las condiciones meteorológicas correspondientes a cada categoría están detalladas en el documento interno CENMA ("Tipificación preliminar de condiciones asociadas a distintos valores de Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica"). Se adecúa para Rancagua y se resumen como sigue:

### 1. - PMCA BAJO

Representa muy buenas condiciones de dispersión de contaminantes en el valle de Rancagua, y se asocia a las siguientes características observadas o previstas:

- Ausencia de inversión térmica de subsidencia debido a sistemas frontales activos o marcada inestabilidad.
- Precipitaciones continuas o chubascos asociados a masas de aire inestable.

### 2. - PMCA REGULAR/BAJO

Se asocia en general a buenas condiciones de ventilación y se caracteriza por los siguientes rasgos:

- Inversión térmica de subsidencia débil y elevada.
- Sistemas frontales de regular actividad, precipitaciones aisladas o intermitentes, y condiciones de inestabilidad postfrontal.
- Advecciones de aire húmedo y nubosidad baja desde la costa central.
- Bajas segregadas en altura o núcleos fríos asociados a chubascos y a un marcado debilitamiento de la inversión térmica de subsidencia.

### 3. - PMCA REGULAR

Se asocia a condiciones de ventilación regulares y correspondería a:

- Predominio de altas presiones y normalmente ausencia de vaguadas costeras y precipitaciones.



- Base de la inversión térmica ubicada entre 500 y 800 m s.n.m. y tope ubicado entre 1000 y 1500 m s.n.m.
- Advecciones débiles de aire húmedo y/o nubosidad baja desde la costa central.
- Condiciones prefrontales y paso de sistemas frontales débiles o en altura.

#### 4. - PMCA REGULAR/ALTO

Se asocia a condiciones de ventilación mala o crítica, y se relaciona con las siguientes configuraciones:

- Presencia de vaguadas costeras asociadas a una configuración tipo A. (Rutllant et al. 1993; Rutllant 1994).
- Predominio de altas presiones en superficie y marcada subsidencia en la Zona Central, asociada o no a la propagación de vaguadas costeras, y caracterizada por marcados movimientos de descenso de masas de aire, intensificación y descenso de la inversión térmica de subsidencia.
- Condiciones prefrontales asociadas a un bajo factor de ventilación. Condición tipo BPF. (Rutllant et al. 1993; Rutllant 1994)
- Inversión térmica de subsidencia con base ubicada bajo 500 m s.n.m, y tope entre 700 y 1200 m, con una diferencia térmica entre la base y el tope del orden de 10°C.
- Índice de Circulación Zonal medio o alto.

#### 5. - PMCA ALTO

Las configuraciones sinópticas asociadas son similares a las descritas en el punto anterior (PMCA Regular-Alto), pero representaría las condiciones más intensas, mejor definidas y más persistentes de las configuraciones descritas.

- Presencia de vaguada costera asociada a una configuración tipo A. (Rutllant et al. 1993; Rutllant 1994).
- Predominio de altas presiones y marcada subsidencia en la Zona Central, asociada o no al paso de vaguadas costeras; pero caracterizada por



marcados movimientos de descenso de masas de aire, e intensificación y descenso de la inversión térmica de subsidencia.

- Condiciones prefrontales asociadas a un bajo coeficiente de ventilación. Condición tipo BPF. (Rutllant et al. 1993; Rutllant 1994).
- Inversión térmica de subsidencia con base normalmente ubicada bajo los 300 m s.n.m, y tope entre 700 y 1000 m, con una diferencia térmica entre la base y el tope del orden de 15° C.
- Índice de Circulación Zonal bajo, lo que determinaría una mayor profundización de la configuración, y el lento desplazamiento de la misma, pudiendo traer como consecuencia una mayor duración de las condiciones críticas sobre la Zona Central.

Se desprende de esta tipificación, que las configuraciones asociadas a las categorías 1, 2, y 3 (Bajo, Regular-Bajo, y Regular), corresponderían a condiciones de no-episodios, en tanto las configuraciones asociadas a las categorías 4 y 5 (Regular/Alto y Alto), estarían asociadas por lo general a condiciones de episodios de alta contaminación atmosférica por MP10.

El valor asignado al PMCA dependerá de la intensidad o grado de definición que presente la configuración sinóptica, siendo por lo tanto en ocasiones difícil determinar, en términos absolutos, una clasificación de PMCA para cada configuración.

El PMCA referenciado a Santiago, es aplicable a Rancagua, en la época comprendida entre Abril y Agosto, y se le asocia a concentraciones de material particulado MP10.

### Descripción Base de Datos

Nomenclatura usada para las variables medidas en superficie (calidad de aire, meteorología):

XXttss XX código de tipo de variable  
ttt período de tiempo  
ss código de estación

Nomenclatura usada para las variables de altura (radiosonda):

XXzzttt XX código de variable de altura  
zz código de nivel de altura  
ttt período de tiempo

Tabla 1 Nomenclatura usada en la construcción de nombres de variables.

CODIGO	Descripción
<b>Variables</b>	<b>Calidad del aire</b>
MP	Concentraciones de MP10
DS1	Variación semanal de un día
<b>Variables</b>	<b>Meteorológicas</b>
T	Temperatura del aire (°C)
HR	Humedad relativa (%)
WS	Rapidez del viento (m/s)
DIR	Dirección del viento (°)
<b>Período</b>	<b>Hora</b>
6	06 hora local
18	18 hora local
23	23 hora local
12	12 UTC
0	0 UTC
D1	Día siguiente
D2	Día subsiguiente
6D1-6D2	Promedio fijo entre las 7 horas del día siguiente y las 6 horas del día subsiguiente
18D1-18D2	Promedio fijo entre las 19 horas del día siguiente y las 18 horas del día subsiguiente
<b>Niveles</b>	<b>Altura</b>
850	Nivel de 850 hPa
500	Nivel de 500 hPa
<b>Categoría</b>	<b>Ventilación</b>
PMCA	Potencial meteorológico de contaminación atmosférica
<b>Tipo de cálculos</b>	<b>Función</b>
MX	Máximo día
MN	Mínimo día
<b>Otros</b>	
E	Salidas del modelo ETA



Desarrollo de un sistema de pronóstico  
para la ciudad de Rancagua

Variables incluidas en la base de datos de trabajo:

Tabla 2 Variables incluidas en la base de datos de trabajo

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
MP6D1-6D2	Promedio diario de concentraciones de MP10 entre las 7 am del día siguiente y las 6 am del día subsiguiente.
MP18D1-D2	Promedio diario de concentraciones de MP10 entre las 17 pm del día siguiente a las 18 pm del día subsiguiente.
MP23D2	Valor de concentración de MP10 a las 23 horas del día subsiguiente.
DS16D1	Variación diaria de un día, utilizando promedio diario de concentraciones de MP10 entre las 7 am del día siguiente y las 6 am del día actual.
PMCA10D2	Potencial meteorológico de contaminación atmosférica a las 10 de la mañana, válido para la primera parte del día. Para el día subsiguiente.
PMCA22D1	Potencial meteorológico de contaminación atmosférica a las 10 de la noche para el día siguiente, válido para la segunda parte del día.
PMCA22D2	Potencial meteorológico de contaminación atmosférica a las 10 de la noche, válido para la segunda parte del día. Para el día subsiguiente.
TMXED1	Temperatura Máxima pronosticada por modelo ETA para el día siguiente.
HRMNED1	Humedad relativa Mínima pronosticada por modelo ETA para el día siguiente.
WSMNED1	Intensidad del viento pronosticada por modelo ETA para el día siguiente.
T8500D1	Temperatura a la altura de 850hPa a las 00UTC del día siguiente.
T85012D2	Temperatura a la altura de 850hPa a las 12UTC del día subsiguiente.
T85012D1	Temperatura a la altura de 850hPa a las 12UTC del día siguiente.
DIR50012D1	Dirección del viento a la altura de 500hPa a las 12UTC. Para el día siguiente.
DIR50012D2	Dirección del viento a la altura de 500hPa a las 12UTC. Para el día subsiguiente.
DIR500D1	Dirección del viento a la altura de 500hPa a las 00UTC. Para el día siguiente.
TMXD1	Temperatura Máxima en estación Rancagua del día siguiente.



### Estadística descriptiva de las variables usadas en el estudio

En las Tablas se presentan algunas estadísticas de las variables incorporadas a la base de datos preliminar.

La base de datos incluye un total de 17 variables. La cantidad de datos por variable va desde un máximo de 460 hasta un mínimo de 429 datos.

Tabla 3 Estadística descriptiva de las variables incluidas en la base de datos años 2004-2008.

VARIABLES	Nº datos	Valor mínimo	Valor máximo	Valor promedio	Desviación estándar
MP6D1-6D2	429	9	325	94	48
MP18D1-18D2	434	8	317	94	50
DS16D1	429	9	335	94	49
MP23D2	436	8	659	164	106
PMCA10D2	460	1	5	3	1
PMCA22D1	460	1	5	3	1
PMCA22D2	460	1	5	3	1
TMXED1	458	5	29	18	5
HRMNED1	458	2	89	26	19
WSMNED1	458	0	16	3	3
T8500D1	430	-4	21	10	5
T85012D2	456	-3	22	10	5
T85012D1	456	-3	22	10	5
DIR50012D2	449	0	355	264	55
DIR50012D1	449	0	355	263	56
DIR500D1	429	15	355	270	48
TMXD1	452	6	27	15	4



## Contenido reportes diarios de pronóstico

Se emitirán dos reportes diarios, uno preliminar al mediodía y otro definitivo a las 18 horas:

Reporte de las 12 horas incluye dos informes:

a. Reporte de Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA) matutino (\*) que incluye:

- Resumen valores MP10 día anterior
- Resumen valores MP10 actuales
- Tabla de contingencia acierto PMCA
- Tabla con pronóstico PMCA a 5 días

b. Reporte Modelo Calidad de Aire

Reporte que indica:

Resultado de las ecuaciones de pronóstico de calidad de aire para la estación monitora de Rancagua 06 am día subsiguiente. Los niveles de calidad de aire estarán basados en promedios fijos (7 a 6 horas), con umbrales de 150, 195, 240 y 330  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Junto a esto, se incluirá una tabla de contingencia que de cuenta del acierto del Modelo de Calidad de Aire.

(\*) PMCA: Es la categorización del factor de ventilación basado en las condiciones meteorológicas, especialmente relacionadas a escala sinóptica.

El PMCA es inversamente proporcional al factor de ventilación, entendiéndose por ese factor al producto del espesor de la capa de mezcla superficial con el viento promedio dentro de la capa.



Reporte de las 18 horas:

a. Reporte de Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA) vespertino que incluye:

- Tabla con pronóstico PMCA a 5 días
- Opinión experta, resumen condición actual y pronosticada tanto meteorológica como de calidad de aire.