

Evaluación de los Modelos de Pronóstico de MP10 actualmente en Uso en la Región Metropolitana.

Documento Final

Preparado para
CONAMA RM

Preparado por
Rainer Schmitz
Mark Falvey

DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA
Universidad de Chile
Mayo, 2007

Evaluación de los Modelos de Pronóstico de MP10 actualmente en Uso en la Región Metropolitana

1. Introducción

El Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana (PPDA) en su documento oficial¹, establece un plan operacional para enfrentar episodios críticos de contaminación por Material Particulado con diámetro menor de 10 micrómetros (MP10), lo anterior con el objetivo de prevenirla exposición de la población a altos niveles de contaminación. Para conseguir este propósito el PPDA contempla la aplicación de medidas preventivas permanentes de control de emisiones de contaminantes entre el 1º de abril y el 30 de agosto² (periodo de empeoramiento de las condiciones de ventilación en la región) y medidas de mitigación durante episodios en caso de preverse situaciones de episodio crítico de contaminación (Alerta, Preemergencia o Emergencia). Para detectar estos eventos, se cuenta con un sistema de seguimiento de las condiciones meteorológicas y de calidad del aire que permite alimentar un modelo de pronóstico de concentraciones de Material Particulado.. Esto se traduce en la implementación de medidas de control de fuentes móviles (restricción vehicular, vías exclusivas, reversibles y permanentes) y fuentes fijas y difusas (paralización industrial, prohibición de quema, uso de chimeneas, etc), para reducir las emisiones de contaminantes.

Para prevenir la eventual exposición de la población a altas concentraciones de Material Particulado, se dispone de un sistema de difusión del pronóstico diario de calidad del aire, orientado a informar a la ciudadanía respecto a la evolución de los índices de calidad ambiental observados que determinan la declaración de episodios y la aplicación de medidas prevención y de control. Para verificar el cumplimiento de las medidas establecidas (permanentes y en episodios), se cuenta con un sistema de fiscalización que coordina CONAMA Metropolitana y que registra diariamente el acatamiento de la ciudadanía. Se configura entonces la estructura específica del Plan Operacional para la Gestión de los Episodios Críticos según se indica en la siguiente figura.

Este documento tiene como propósito de evaluar el modelo de pronóstico de calidad del aire para material particulado vigente en la Región Metropolitana a través de identificar sus potenciales y limitaciones. Este diagnóstico incluye tanto el modelo propiamente tal como el uso del Índice de Calidad del Aire por Material Particulado (ICAP) en su forma actual como variable predictiva. Se incluyen sugerencias para el mejoramiento del pronóstico.

¹ Ver D.S. N°16/98 del MINSEGPRES que Establece el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana y sus modificaciones y reformulaciones establecidas en el D.S.N°20/2001 y D.S. 58/2004 respectivamente.

² CONAMA RM extiende el periodo de seguimiento de episodios Críticos hasta el 17 de septiembre de cada año.

2. El modelo de pronóstico de calidad del aire para material particulado vigente en la Región Metropolitana

2.1. Descripción del modelo

El pronóstico de calidad del aire para material particulado vigente en la Región Metropolitana se basa en el denominado modelo Cassmassi (Cassmassi, 1999). Este modelo fue desarrollado a partir de la información de calidad de aire medida por la red MACAM y de la información meteorológica de altura de la zona central del país, entre el 1 de abril y el 17 de septiembre de los años 1997 y 1998.

La metodología de este modelo está basada en algoritmos de cálculo desarrollados mediante la aplicación de técnicas estadísticas de regresión múltiple, enfocadas a encontrar relaciones entre posibles predictores y la variable a predecir. Los predictores incluyen variables meteorológicas observadas, índices de condiciones meteorológicas pronosticadas, concentraciones de contaminantes observadas, índices de variaciones esperadas de emisiones y otros.

El modelo Cassmassi pronostica el valor máximo de concentración promedio de 24 horas de material particulado respirable (MP10), para el período de 00 a 24 horas del día siguiente, expresadas en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), en cada una de las estaciones de la red MACAM-2 clasificadas como estaciones de monitoreo de MP10 con representatividad poblacional (EMRP). Estas son: Av. La Paz, La Florida, Las Condes, Parque O'Higgins, Pudahuel, Cerrillos y El Bosque, según lo establece la Resolución N° 11.481 de 1998 del SESMA.

La concentración pronosticada para el día siguiente se calcula mediante ecuaciones diferentes para cada estación de monitoreo de calidad de aire. Las variables que se requieren para el cálculo de las ecuaciones se obtienen de información relacionada con el cambio esperado de las concentraciones según día de la semana, las concentraciones de PM10 medidas en la red MACAM-2, la información meteorológica de altura obtenida del radiosondeo realizado por la Dirección Meteorológica de Chile en Santo Domingo y de las condiciones meteorológicas de escala sinóptica y regional observadas y pronosticadas para la región. La única variable dentro de todas variables que se usan en el cálculo que se pronostica es el llamado Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA). Por su importancia en el pronóstico de material particulado se merece una atención especial.

2.2. Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA)

El PMCA es una medida meteorológica, siendo su valor inversamente proporcional al factor de ventilación después del mediodía, entendiéndose por factor de ventilación el producto del espesor de la capa de mezcla superficial por el viento medio dentro de la capa.

Para efectos operacionales, y sobre la base de las condiciones observadas y analizadas en 1996, se efectuó una tipificación de condiciones sinópticas asociadas a distintos valores del PMCA. Se definieron cinco categorías del PMCA que se resumen en la tabla 2.1 (según <http://www.conama.cl/rm/568/article-1110.html>). Cabe señalar que el PMCA es una variable subjetiva y discreta.

Tabla 2.1: Definición de PMCA

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

La descripción detallada del modelo Cassmassi se encuentra en el estudio "Improvement of the Forecast of Air Quality and of the Knowledge of the Local Meteorological Conditions in the Metropolitan Region" (Cassmassi 1999), cuyos informes están disponibles para consultas en dependencias de la Dirección Regional Metropolitana de CONAMA. (A pesar de que se han efectuado varios estudios

posteriores con fines de modificar el modelo de pronóstico (ver sección 4), el modelo oficial sigue siendo el original tal como está descrito en ese estudio.)

3. Evaluación del modelo de pronóstico de calidad del aire para material particulado vigente en la Región Metropolitana

3.1. Antecedentes

Para la evaluación de resultados de modelos de pronóstico existen diferentes parámetros estadísticos; todos ellos se basan en el análisis de series de tiempo. Algunos ejemplos de esos parámetros son: coeficiente de correlación, sesgo promedio, error absoluto promedio, acierto, entre otros. El uso de una u otra variable depende de lo que se pretende demostrar con una cierta evaluación. El D.S. N° 59 de 1998 del Ministerio Secretaría General de la República establece como variable de evaluación la “confiabilidad”. Se ha establecido que esta “confiabilidad” se mide en términos del acierto, entendiendo por acierto el número total de los buenos pronósticos (la categoría pronosticada coincide con la observada) dividido por el número total de todos los pronósticos (buenos y malos) en porcentaje.

El comportamiento de modelos de pronóstico tiene mayor relevancia para eventos de episodio, cuando se esperan niveles altos de concentración de MP10 y se deben adoptar decisiones sobre la aplicación de medidas de control y reducción de actividades de fuentes emisoras. Las decisiones administrativas están basadas en la ocurrencia de niveles de contaminación por encima de límites de concentración dados. En el caso de MP10 los niveles de calidad del aire son clasificados en tres categorías: Alerta, Pre-Emergencia, Emergencia (en el periodo de evaluación no hubo emergencias y, por lo tanto, no se van a incluir en este análisis). En lo siguiente se efectuará tanto un análisis global del desempeño del modelo de pronóstico como uno enfocado en episodios de evento.

3.2. Periodo de evaluación y datos usados

El periodo de la evaluación del modelo de pronóstico es de cinco años, desde 2002 hasta 2006; durante cada año se aplicó el pronóstico durante los meses abril y agosto (las fechas exactas en las tablas del ANEXO I ha variado según la contratación del servicio por parte de la CONAMA). Los datos usados en este estudio fueron entregados por CONAMA RM y representan los pronósticos y las observaciones, ambos en términos de las siguientes cuatro categorías: bueno - regular, alerta, preemergencia, emergencia. Las instituciones encargadas del pronóstico en ese tiempo fueron el Centro Nacional de Medioambiente (CENMA) entre 2002-2005 y la Universidad de Santiago de Chile (USACH) en 2006.

3.3. Evaluación global

El D.S. N° 59 de 1998 exige a los modelos de pronóstico una confiabilidad (o sea un acierto) superior al 65% por estación monitorea clasificada como estación monitorea con

representatividad poblacional (todas las estaciones de la red MACAM-2 caben dentro de esta clasificación). En el año 2000, ya se realizó una evaluación del modelo Cassmassi por parte del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (Fuenzalida, 2000). Esa evaluación mostró que el modelo Cassmassi cumplía con los requisitos del Decreto Supremo. N° 59 de 1998. Dentro de este proyecto se puede confirmar que el modelo con un acierto promedio de un 84% sigue cumpliendo la norma.

Sin embargo, ese número alto de acierto merece cierta atención: La mayor cantidad de días (89%) entre 2002 y 2006 fueron de la categoría “bueno – regular”. En consecuencia, aplicando un “pronóstico” de “bueno-regular” todos los días significaría un acierto de también un 89%, y, de esta manera cumpliendo con el D.S. N° 59 de 1998, y, además, logrando un mejoramiento del acierto en un 5% con respecto al modelo Cassmassi. Sin embargo, es obvio que un “pronóstico” de este tipo no tiene ninguna utilidad. Además, este ejemplo muestra que evaluar el desempeño global del modelo entrega poco valor y que hace necesario evaluar en más detalle el desempeño durante eventos de episodio.

3.4. Evaluación de eventos de episodio

Los resultados de un pronóstico de calidad del aire suelen ser presentados en forma de tablas de contingencia, donde se resume el número de casos observados de cada categoría, clasificados según la categoría estimada por el modelo de pronóstico. Las Tablas 3.1-3.5 del ANEXO I presentan esas tablas de contingencia para los años 2002 hasta 2006. Dado que en esta sección se enfoca solamente en los eventos de episodios, se ha extraído parte de la información de las Tablas AI.1-AI.5, la cual se presenta en lo siguiente.

Alertas

La Tabla 3.1 entrega el desempeño del pronóstico para los casos en los cuales el modelo Cassmassi pronosticó la categoría “alerta”. En estos casos un acierto significa tanto el pronóstico como la observación fueron “alerta”. Un falsa alarma (FA) significa que el pronóstico fue “alerta”, pero se observó “bueno-regular”. Finalmente, un evento no alertado (ENA) significa que el pronóstico fue “alerta”, pero se observó “preemergencia”. La Tabla 1¿? presenta los FA, ENA, los aciertos y el número total de pronósticos de “alerta” para todos los años y en términos de su promedio. Se puede ver que en el caso que el modelo pronostica “alerta” que es muy probable que sea un alarma falsa (73% de probabilidad en promedio) y muy poco probable que en los días pronosticados “alerta” se observe una preemergencia (5% en promedio). El acierto también es bastante bajo con un 22% en promedio. Con respecto a la evolución temporal del desempeño no se observa una tendencia significativa durante los últimos cinco años.

Tabla 3.1: Tabla de contingencia para días con pronóstico de “alerta”.

Alertas (Pronosticadas)						
	2002	2003	2004	2005	2006	Promedio
FA (%)	67	72	68	81	77	73
ENA (%)	9	6	5	6	0	5
Acierto (%)	24	22	27	13	23	22
Número de Pronósticos	33	32	22	16	31	26.8

La Tabla 3.2 indica los ENA con respecto al las observaciones de “alerta”. En este caso un ENA significa que en un día se observó una “alerta” pero se había pronosticado “bueno-regular (además da el número total de días de “alertas” observadas). Se puede ver que en relativamente pocos días (30% en promedio) en los cuales realmente se observaron “alertas” el modelo no alertó.

Tabla 3.2: Tabla de contingencia para días con observación de “alerta”.

Alertas (Observadas)						
	2002	2003	2004	2005	2006	Promedio
ENA (%)	13	40	11	60	26	30
Número de días de “alertas” observadas	15	23	9	5	15	13.4

En resumen, el rasgo más destacable de este análisis es la fuerte tendencia del modelo a ar falsas alarmas. Un indicador adicional para esta tendencia es el hecho que en promedio hay dos veces más días pronosticados de “alerta” de lo observado.

Preemergencias

Similar al análisis de la “alertas” se entrega un análisis del desempeño del modelo con respecto a las “preemergencias”. La Tabla 3.3 entrega valores de FA y ENA. La interpretación de los FA y los ENA es un poco distinta en el caso de las “preemergencias” a lo que fueron para las “alertas”: Los FA en este caso representan el porcentaje de los pronósticos de “preemergencia” cuando se observó o “bueno-regular” o “alerta”. Los ENA representan el porcentaje de aquellos días en los cuales se observó una “preemergencia” pero se había pronosticado “bueno-regular” o “alerta”.³

El desempeño del modelo con respecto a las “preemergencias” es muy bajo con un promedio de un 87% de falsas alarmas y un 74% de eventos no alertados. Al igual del pronóstico de “alertas” se observa un clara tendencia de sobre-pronosticar el número de eventos. El promedio de preemergencias pronosticadas en los últimos cinco años fue de 6.04 días y de los días observados solamente 3.6 días; es decir se pronosticaron 1.78 veces más días de preemergencias de que se observaron. Sin embargo, parte del bajo desempeño en pronosticar preemergencias se puede explicar por los pocos casos de la misma, lo que radica en que no existe un número significativo de esos eventos extremos para establecer una estadística robusta.

³ La suma de los FA y los pronósticos acertados dan un 100%. La suma de los ENA y las preemergencias correctamente pronosticadas también da un 100%.

Tabla3.3: Tabla de contingencia para días de “preemergencia” (pronosticada y/u observada)

Preemergencias (Pronosticadas y/u Observadas)						
	2002	2003	2004	2005	2006	Promedio
FA (%)	67	87	80	100	100	87
ENA (%)	43	75	50	100	100	74
Número de días de “preemergencias” observadas	7	4	2	2	3	3.6

Pronóstico por estación

Una de las características del modelo Cassmassi es que contempla una ecuación de pronóstico para cada estación. Es decir, el modelo pronostica los valores máximos de concentración promedio de 24 horas para cada estación con su ecuación respectiva. Sin embargo, las tablas de contingencia (Tablas 3.1-3.5) no toman en cuenta ese detalle. De hecho, puede ocurrir el siguiente caso: una estación pronostica un episodio para el día siguiente para si misma, lo cual no se observa el día siguiente. Sin embargo, si en otra estación se observa el episodio (aunque esa estación no lo haya pronosticado), este pronóstico se registra como acierto. En el Anexo II se muestran las tablas de contingencia para cada estación para los años 2005 y 2006. En resumen, aparte de la categoría “alerta” en las estaciones Pudahuel y Parque O’Higgins en el año 2006 con un acierto de 38% y 20%, todos los otros aciertos para las categorías “alerta” o “preemergencia” fueron de un 0%. Es decir, el modelo no tiene la capacidad de pronosticar episodios para las estaciones individuales.

4. Análisis

La evaluación del modelo de pronóstico indica que su desempeño para eventos de episodios no es satisfactorio. Como posibles fuentes de error se pueden identificar por lo menos las siguientes cinco: i) coeficientes del modelo Cassmassi ii) el método matemático del modelo Cassmassi, iii) el uso del PMCA, iv) la aplicación del ICAP y v) información meteorológica disponible. En lo siguiente se analiza cada fuente de error por separado. Además, se elabora la posibilidad de un pronóstico probabilístico y de uno numérico.

Coefficientes del modelo Cassmassi

Tal como se ha mencionado en la sección 2 de este informe, el modelo Cassmassi es de tipo regresión lineal múltiple. Las ecuaciones y sus coeficientes fueron desarrollados con datos de los años 1997-1998 y han sido usado hasta hoy día en su forma original en el pronóstico. Sin embargo, debido a distintos tipos de medidas la situación desde ese entonces hasta ahora en términos de niveles de concentración ha cambiado significativamente. Mientras en los años 1997/1998 las concentraciones en su promedio anual en estos años fueron mayores de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en los años que fueron considerados en este estudio el promedio ha sido menor de $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo cual significa una disminución en más de un 12%. (El cambio en episodios desde 1997/1998 a 2005/2006 es más fuerte aún: De 2.5 “emergencia” al año en 1997/1998 a ninguna en 2005/2006, de 30 “preemergencias” a 2.5 y de 40.5 “alertas” a 10.) Además, a pesar que las estaciones de la red MACAM son de tipo EMRP, en ningún caso se puede descartar algún impacto antropogénico local. En general, estos impactos no son estáticos sino pueden cambiar en el tiempo. A modo de ejemplo se pueden mencionar algunos de esos impactos antropogénicos no-estáticos: construcción de un edificio, evento social, terminal de buses con una composición de buses según la tecnología vigente, etc.

En 2005 CENMA en un estudio encargado por CONAMA RM efectuó un ajuste de los coeficientes del modelo Cassmassi (manteniendo las ecuaciones) considerando datos de los años 2000-2003. Este ajuste de los coeficientes mostró un mejor desempeño del modelo con respecto a valores medios. Para valores altos, no se obtuvo mejoras significativas. Sin embargo, en la estación Pudahuel, la tendencia de sobre-estimar disminuyó significativamente.

Sugerencia: Cualquier modelo (sea de tipo estadístico o dinámico) debería ser actualizado con la mayor frecuencia posible (preferiblemente todos los días) con los datos más recientes disponibles.

Método matemático del modelo Cassmassi.

Un pronóstico a través de un modelo de regresión lineal múltiple es de tipo estadístico basado en un análisis de serie de tiempo. Aparte de la regresión lineal múltiple existen mucho otros métodos estadísticos que se pueden usar para el pronóstico. Uno de ellos son las redes neuronales. A contrario de la regresión lineal los modelos neuronales tienen características no-lineales. Dado que la calidad del aire está controlada por procesos no-lineales (meteorología y química) se podría pensar que el bajo desempeño

del modelo Cassmassi en parte se puede atribuir a su característica lineal, y la aplicación de una red neuronal tenga la capacidad de mejorar esa deficiencia. Está fuera de alcance de este informe un análisis detallado sobre los potenciales de las redes neuronales. En lo siguiente se limita a comparar el desempeño de un modelo tipo red neuronal, desarrollado por la USACH, con el modelo Cassmassi.

En el año 2006 el equipo de la USACH estuvo a cargo del pronóstico de MP10 para la Región Metropolitana y aplicó en forma paralela al modelo Cassmassi un modelo de pronóstico tipo red neuronal. Este modelo usa las siguientes variables de entrada: temperatura máxima observada y pronosticada, concentraciones de PM10 y el PMCA. Durante todo el período del pronóstico se entregaba todos los días tanto el pronóstico del modelo red neuronal como del modelo Cassmassi. En términos globales, el acierto del modelo red neuronal con un 87% estuvo arriba de lo del modelo Cassmassi (78%). (El ANEXO III entrega la tabla de contingencia completa del modelo red neuronal para el año 2006.) Sin embargo, como se había mencionado antes, el acierto global no es una buena medida para evaluar el desempeño de un pronóstico, sino se tiene que evaluar el desempeño de los modelos para eventos de episodio. Las Tablas 4.1-4.2 dan un resumen del desempeño de ambos modelos (la interpretación de los FA y los ENA sigue según sección 3) para episodios de “alerta”. El modelo red neuronal es mucho más conservador en pronosticar “alertas” que el modelo Cassmassi; pronóstico 15 veces “alerta” versus 31 veces en el caso del modelo Cassmassi. Además, en comparación al modelo Cassmassi, aumentó el acierto y bajó las FA significativamente. Sin embargo, también tuvo ENA; en un 13% de los casos que se pronosticó “alerta” se observó “preemergencia”, lo cual no ocurrió en el caso del modelo Cassmassi. Con respecto a las “alertas” observadas (15 días), el modelo red neuronal pronosticó en un 66% “bueno-regular”, mientras el modelo Cassmassi solamente lo hizo en un 26% de los casos (Tabla??).

Tabla 4.1: Tabla de contingencia para días con pronóstico de “alerta” para los modelos Cassmassi y red neuronal para 2006.

Alertas (Pronosticadas)		
	Cassmassi	Red neuronal USACH
FA (%)	77	53
ENA (%)	0	13
Acierto (%)	23	34
Número de Pronósticos	31	15

Tabla 4.2: Tabla de contingencia para días con observación de “alerta” para los modelos Cassmassi y red neuronal para 2006.

Alertas (Observadas)		
	Cassmassi	Red neuronal USACH
ENA (%)	26	66
Número de días de “alertas” observadas	15	15

Con respecto a las “preemergencia” ninguno de los dos modelos mostró capacidad de pronosticarlos. Ambos tuvieron un 100% de ENA y FA (Tabla??)

Tabla 4.3: Tabla de contingencia para días con pronóstico y/u observación de “preemergencia” para los modelos Cassmassi y red neuronal para 2006.

Preemergencias (Pronosticadas y Observadas)		
	Cassmassi	Red neuronal USACH
FA (%)	100	100
ENA (%)	100	100

En resumen, el modelo red neuronal muestra un cierta mejora en algunos aspectos relacionados on días de “alerta”. Sin embargo, no es evidente si es por el método matemático o porque fue entrenado con datos más recientes (cuando en el caso del modelo Cassmassi todavía se usan los coeficientes originales). Con respecto a días de “preemergencia” ambos modelos no tienen capacidad de pronóstico.

Sugerencia:

Se estima muy conveniente ocupar otros modelos aparte del modelo Cassmassi para el pronóstico. Las redes neuronales sin duda son una de esas alternativas. Sin embargo, el uso del modelo red neuronal en el año 2006 también mostró que no es suficiente cambiar el método matemático, sino que otros cambios también son necesarias (por ejemplo cambios en el método de pronosticar las condiciones meteorológicas).

PMCA

Tal como fue explicado en la sección 2 el PMCA es una medida meteorológica, siendo su valor inversamente proporcional al factor de ventilación. El PMCA es la única variable dentro de las ecuaciones del modelo Cassmassi que se pronostica, y, además, tiene una ponderación fuerte en las ecuaciones. Dada su importancia dentro del modelo de pronóstico hace necesario darle particular atención a esta variable. Las dos características en las cuales se enfoca la siguiente discusión es que el PMCA es i) subjetivo y ii) discreto.

La evaluación del PMCA se basa en el análisis de una gran cantidad de información meteorológica: cartas sinópticas de modelos globales, fotos satelitales, observaciones superficiales y de radio sondeo. Basándose en esa información y en su experiencia profesional el equipo o la persona a cargo emite un pronóstico del PMCA; es decir el pronóstico depende de la experticia y la experiencia del grupo/la persona a cargo. En consecuencia, el desempeño del pronóstico también puede variar según el personal de turno.

Aparte de la subjetividad del PMCA, otra debilidad del mismo es que es una medida discreta. Con sus cinco categorías el PMCA pretende caracterizar una gran variabilidad de condiciones meteorológicas, las cuales, además, en la realidad no son discretas sino continuas. Finalmente, por ser discreto y por el hecho que representa una variable que no se puede medir (“valor inversamente proporcional al factor de ventilación”) resulta que no se puede evaluar el pronóstico del PMCA.

Existe hoy en día información que permite hacer un pronóstico objetivo y, además, con valores continuos a través de pronósticos numéricos de tiempo, sea a través de modelos globales o regionales. Estos modelos entregan un gran número de variables de pronóstico en forma de una grilla tri-dimensional. Esas variables incluyen presión, temperatura, viento, humedad relativa, altura neopotencial, altura de capa de mezcla, entre otras. Además, esas variables están disponibles con una resolución temporal de una hora. Usando una base de dato con datos históricos de un cierto modelo permite establecer ciertas relaciones con MP10 en la cuenca de Santiago. Esas relaciones pueden ser del tipo lineal (por ejemplo a través de una regresión lineal múltiple) o no-lineal (por ejemplo a través de una red neuronal).

Sugerencia: Se sugiere independizar el modelo de pronóstico del PMCA y establecer un pronóstico meteorológico objetivo basado en modelos numéricos.

ICAP

El ICAP es un índice que describe las concentraciones de MP10 de promedio de 24 horas. A pesar que no existe ninguna norma que definiera cómo calcular el ICAP (por ejemplo promedio de 24 horas centrado en el tiempo), se ha establecido que el ICAP se calcula en base de las últimas 24 horas. En otras palabras: El ICAP representa la “memoria” de 24 horas de las concentraciones de PM10. A modo ejemplo: el ICAP a la 1 hrs de la mañana del día actual toma en cuenta 23 valores del día anterior (a partir de las 2 hrs hasta la media noche) más un valor del día actual (el de la 1 hrs de la mañana). Siguiendo este ejemplo, eso significa que, si se calcula un ICAP suficientemente alto para una preemergencia a la una de la mañana, eso no necesariamente significa que los valores del día actual van a estar altos, sino que estuvieron altos el día anterior. En consecuencia, tal como se usa el ICAP hoy en día se caracteriza lo que pasó en el pasado y no lo que va a pasar en el futuro. Eso puede ser razonable en términos de diagnóstico (“A qué niveles de contaminación estuvo expuesta la población en los últimos 24 horas?”). Sin embargo, este uso no tiene sentido en términos de pronóstico. En consecuencia, el pronóstico de una variable con características de diagnóstico (como es el ICAP) representa un práctica incoherente.

Para eliminar esta incoherencia sería lógico establecer *un* valor por día que representa un promedio de 24 horas (en vez de él máximo de 24 valores como se hace en el sistema vigente). Para este período de 24 horas se sugiere el periodo de las 6 horas del día siguiente hasta las 6 horas del día subsiguiente por la siguiente razón: Las emisiones tienen un ciclo diario. Dentro de este ciclo los valores más bajos se encuentran entre a la medianoche y las 6 horas de la mañana. Sin embargo, en casos de eventos 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 de la mañana 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 el entre las 6 horas del día siguiente hasta las 6 horas del día subsiguiente. Eso también tiene sentido en términos de medidas: todas las medidas que se toman en casos de eventos de episodio tienen su mayor impacto a partir de las 6 horas de la mañana y, en consecuencia, coincidirían con el período del valor pronosticado.

Sugerencia:

Se sugiere establecer el pronóstico del valor promedio de 24 horas, calculado en el período entre las 6 horas del día siguiente y las 6 horas del día subsiguiente.

Pronóstico Probabilístico

Los procesos físicos y químicos de la contaminación atmosférica son hasta un grado bastante alto conocidos. Incluso, esos procesos se pueden ser representados de una manera determinística. Sin embargo, la componente antropogénica (a través de las emisiones) es de naturaleza estadística. Se conocen algunas características promedias de las emisiones (tal como las describen los inventarios de emisiones). Sin embargo, existen fluctuaciones con respecto esos promedios. Esas fluctuaciones son de tipo aleatorio; eso significa que no se pueden pronosticar. Dado que existe esta contribución aleatoria al fenómeno de la contaminación atmosférica, significa que ella tampoco puede ser pronosticada con seguridad, sino solamente con un cierto grado de probabilidad. A través del uso de métodos estadísticos se puede cuantificar esa probabilidad.

Sugerencia: El pronóstico de MP10 debería ser entregado de una manera probabilística en términos de la probabilidad que una cierta condición o ciertas condiciones pueden ocurrir.

Desarrollo de un pronóstico numérico

El uso de modelos estadísticos (por ejemplo regresión lineal múltiple o red neuronal) tiene dos grandes ventajas: i) se pueden desarrollar y usar cuando no se conocen todos los procesos relevantes de un fenómeno y ii) tiene una exigencia computacional muy baja. La razón del comienzo del uso de modelos estadísticos en el pronóstico de calidad del aire en los años 1970s tiene su origen en estas ventajas. Sin embargo, se han observado grandes avances en las últimas décadas al respecto. Por un lado, se ha aumentado significativamente el conocimiento de los procesos relevantes en la contaminación atmosférica (tanto en los procesos físicos como químicos), lo cual se ha manifestado también en el desarrollo de modelos numéricos tri-dimensionales que tratan esos procesos explícitamente. Por otro lado, la evolución explosiva en términos de capacidad computacional ha permitido el uso de esos modelos incluso para fines de pronóstico con alta resolución espacial. Muchos de estos pronósticos hoy en día se limitan todavía al pronóstico de la fase gaseosa de la química atmosférica (con ozono como su variable principal), pero ya existen algunos ejemplos que incluyen también MP10. Estos modelos tienen la gran ventaja que entregan una cobertura espacial completa de concentraciones (en vez de valores puntuales como en el caso de los

modelos estadísticos) y permiten entender procesos responsables para los fenómenos que se observan. Además, permiten la incorporación de medidas en su pronóstico. Sin embargo, para el caso de Santiago todavía no se han suficientemente aplicado y optimizado para su uso operacional.

Sugerencia:

Se sugiere desarrollar un sistema de pronóstico basado en un modelo numérico para su uso operacional a mediano plazo.

Información meteorológica

La Región Metropolitana cuenta con una red meteorológica con varias estaciones de superficie. La evaluación de la calidad de esta red es parte de otro proyecto de la CONAMA RM en curso, y no forma parte de este estudio. Sin embargo, se estima conveniente mencionar en relación al pronóstico de MP10 que Santiago no cuenta con ninguna información meteorológica en altura. La red meteorológica carece de cualquier tipo de mediciones verticales. Considerando la importancia de la estructura térmica vertical de la atmósfera en el tema de la contaminación atmosférica, parece indispensable que las autoridades consideren la adquisición de un equipo con tales características.

Sugerencia: Se debería implementar un sondeador acústico en la cuenca de Santiago.

5. Bibliografía

- Cassmassi, Joseph, 1999, Improvement of the forecast of air quality and of the knowledge of the local meteorological conditions in the Metropolitan Region, Informe final, CONAMA RM.
- Fuenzalida, Humberto, 2000, Evaluación de los informes técnicos No. 2 y 3, Mejoramiento del pronóstico de calidad del aire y del conocimiento de las condiciones meteorológicas locales de la Región Metropolitana, Informe final, CONAMA RM.
- CENMA, 2000, Pronóstico Meteorológico y de Calidad del Aire para Material Particulado PM10 para la Gestión de Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica Periodo 2000, CONAMA RM. Informe Final
- CENMA, 2001, Pronóstico Meteorológico y de Calidad del Aire para Material Particulado PM10 para la Gestión de Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica Periodo 2001, CONAMA RM. Informe Final.
- CENMA, 2002, Pronóstico Meteorológico y de Calidad del Aire para Material Particulado PM10 para la Gestión de Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica Periodo 2002, CONAMA RM.
- USACH, 2002, Apoyo al sistema de gestión de episodios críticos en la Región Metropolitana. CONAMA RM. Informe Final.
- CENMA, 2003, Pronóstico Meteorológico y de Calidad del Aire para Material Particulado PM10 para la Gestión de Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica Periodo 2002, CONAMA RM. Informe Final
- CENMA, 2003, Actualización del Modelo de Pronóstico de Calidad del Aire para Material Particulado Vigente en la Región Metropolitana, Informe Final, CONAMA RM.
- CENMA, 2004, Pronóstico Meteorológico y de Calidad del Aire para Material Particulado PM10 para la Gestión de Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica Periodo 2004, CONAMA RM. Informe Final.
- CENMA, 2005, Pronóstico Meteorológico y de Calidad del Aire para Material Particulado PM10 para la Gestión de Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica Periodo 2005, CONAMA RM. Informe Final.
- USACH, 2006, Pronóstico Meteorológico y de Calidad del Aire para Material Particulado PM10 para la Gestión de Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica Periodo 2006, CONAMA RM. Informe Final.

ANEXO I

Tabla AI.1: Análisis de Modelo Cassmassi periodo 2002

06 de mayo al 17 de septiembre Observado	Pronosticado				Total	% Acierto
	0	1	2	3		
0	88	22	3	0	113	78
1	2	8	5	0	15	53
2	0	3	4	0	7	57
3	0	0	0	0	0	--
Total	90	33	12	0	135	74
% Acierto	98	24	33	--		
Nº de Aciertos	100					
% Acierto Total	74					
ENA	23%					
FA	54%					

0 = Bueno – Regular

1 = Alerta

2 = Preemergencia

3 = Emergencia

ENA = Episodios No Alertados

FA = Falsas Alarmas

Tabla AI.2: Análisis de Modelo Cassmassi periodo 2003

20 de marzo al 10 de agosto	Pronosticado				Total	% Acierto
Observado	0	1	2	3		
0	93	23	0	0	116	80
1	9	7	7	0	23	30
2	1	2	1	0	4	25
3	0	0	0	0	0	--
Total	103	32	8	0	143	71
% Acierto	90	22	13	--		
Nº de Aciertos	101					
% Acierto Total	71					
ENA	44%					
FA	75%					

Tabla AI.3: Análisis de Modelo Cassmassi periodo 2004

1 de abril al 16 de agosto	Pronosticado				Total	% Acierto
Observado	0	1	2	3		
0	109	15	2	0	126	87
1	1	6	2	0	9	67
2	0	1	1	0	2	50
3	0	0	0	0	0	--
Total	110	22	5	0	137	85
% Acierto	99	27	20	--		
Nº de Aciertos	116					
% Acierto Total	85					
ENA	18%					
FA	70%					

Tabla AI.4: Análisis de Modelo Cassmassi periodo 2005

01 de abril al 16 de septiembre	Pronosticado				Total	% Acierto
Observado	0	1	2	3		
0	149	13	1	0	163	91.4
1	3	2	0	0	5	40
2	1	1	0	0	2	0
3	0	0	0	0	0	--
Total	153	16	1	0	170	89
% Acierto	97.4	12.5	0	--		
Nº de Aciertos	151					
% Acierto Total	88.8					

ENA	71%					
FA	82%					

Tabla AI.5: Análisis de Modelo Cassmassi periodo 2006

01 de abril al 04 de septiembre	Pronosticado				Total	% Acierto
Observado	0	1	2	3		
0	122	24	2	0	148	82
1	4	7	4	0	15	47
2	3	0	0	0	3	0
3	0	0	0	0	0	--
Total	129	31	6	0	166	78
% Acierto	95	23	0	--		
Nº de Aciertos	129					
% Acierto Total	78					
ENA	39%					
FA	81%					

ANEXO II

Respuesta de Modelo Cassmassi por Estación de Monitoreo

Tabla AII.1: Análisis de Contingencia Modelo Ecuaciones Cassmassi Estación La Paz para 2005

01 de abril al 16 de septiembre	Pronosticado				Total	% Acierto
	0	1	2	3		
Observado	0	1	2	3		
0	169	0	0	0	169	100
1	1	0	0	0	1	0.0
2	0	0	0	0	0	--
3	0	0	0	0	0	--
Total	170	0	0	0	170	
% Acierto	99.4	00	--	--		
Nº de Aciertos	169					
% Acierto Total	99.4					
ENA	100					
FA	--					

Tabla AII.2: Análisis de Contingencia Modelo Ecuaciones Cassmassi Estación La Florida para 2005

01 de abril al 16 de septiembre	Pronosticado				Total	% Acierto
	0	1	2	3		
Observado	0	1	2	3		
0	169	0	0	0	169	100
1	1	0	0	0	1	0.0
2	0	0	0	0	0	--
3	0	0	0	0	0	--
Total	170	0	0	0	170	
% Acierto	99.4	--	--	--		
Nº de Aciertos	169					
% Acierto Total	99.4					
ENA	100					
FA	--					

Tabla All.3: Análisis de Contingencia Modelo Ecuaciones Cassmassi Estación Las Condes para 2005

01 de abril al 16 de septiembre	Pronosticado				Total	% Acierto
	0	1	2	3		
Observado	Ori	Ori	Ori	Ori	Ori	Ori
0	168	0	0	0	169	100
1	0	0	0	0	0	--
2	0	0	0	0	0	--
3	0	0	0	0	0	--
Total	168	0	0	0	168	
% Acierto	100	--	--	--		
Nº de Aciertos	168					
% Acierto Total	100					
ENA	--					
FA	--					

Tabla All.4: Análisis de Contingencia Modelo Ecuaciones Cassmassi Estación Parque O'Higgins para 2005

01 de abril al 16 de septiembre	Pronosticado				Total	% Acierto
	0	1	2	3		
Observado	0	1	2	3	Total	% Acierto
0	162	4	0	0	166	97.6
1	2	0	0	0	2	0.0
2	0	0	0	0	0	--
3	0	0	0	0	0	--
Total	164	4	0	0	168	
% Acierto	98.8	0.0	--	--		
Nº de Aciertos	162					
% Acierto Total	96.4					
ENA	100	100				
FA	100	--				

Tabla AII.5: Análisis de Contingencia Modelo Ecuaciones Cassmassi Estación Pudahuel para 2005

01 de abril al 16 de septiembre Observado	Pronosticado				Total	% Acierto
	0	1	2	3		
0	151	14	1	0	166	91.0
1	0	0	0	0	2	0.0
2	0	1	0	0	1	0.0
3	0	0	0	0	0	--
Total	153	15	1	0	169	
% Acierto	98.7	0.0	0.0	--		
N° de Aciertos	151					
% Acierto Total	89.3					
ENA	66.7					
FA	93.8					

Tabla AII.6: Análisis de Contingencia Modelo Ecuaciones Cassmassi Estación Los Cerrillos para 2005

01 de abril al 16 de septiembre Observado	Pronosticado				Total	% Acierto
	0	1	2	3		
0	164	4	0	0	168	97.6
1	2	0	0	0	2	0.0
2	0	0	0	0	0	--
3	0	0	0	0	0	--
Total	166	0	0	0	170	
% Acierto	98.8	4	--	--		
N° de Aciertos	164					
% Acierto Total	96.5					
ENA	100					
FA	100					

Tabla AII.7: Análisis de Contingencia Modelo Ecuaciones Cassmassi Estación El Bosque para 2005

01 de abril al 16 de septiembre Observado	Pronosticado				Total	% Acierto
	0	1	2	3		
0	165	1	0	0	166	99.4
1	3	0	0	0	3	0.0
2	1	0	0	0	1	0.0
3	0	0	0	0	0	--
Total	169	1	0	0	170	
% Acierto	97.6	0.0	--	--		
N° de Aciertos	165					
% Acierto Total	97.1					
ENA	100					
FA	100					

Tabla AII.8: Análisis de Contingencia Modelo Ecuaciones Cassmassi Estación La Paz para 2006

01 de abril al 16 de septiembre Observado	Pronosticado				Total	% Acierto
	0	1	2	3		
0	153	3	0	0	156	98
1	8	0	1	0	9	0.0
2	1	0	0	0	1	0.0
3	0	0	0	0	0	--
Total	162	3	1	0	166	92
% Acierto	94	0	0	--		
N° de Aciertos	153					
% Acierto Total	92					
ENA	90					
FA	100					

Tabla All.9: Análisis de Contingencia Modelo Ecuaciones Cassmassi Estación La Florida para 2006

01 de abril al 16 de septiembre Observado	Pronosticado				Total	% Acierto
	0	1	2	3		
0	157	1	0	0	158	99
1	6	0	1	0	7	0.0
2	1	0	0	0	1	0.0
3	0	0	0	0	0	--
Total	164	1	1	0	166	95
% Acierto	99.4	--	--	--		
Nº de Aciertos	157					
% Acierto Total	95					
ENA	87.5					
FA	12.5					

Tabla All.10: Análisis de Contingencia Modelo Ecuaciones Cassmassi Estación Las Condes para 2006

01 de abril al 16 de septiembre Observado	Pronosticado				Total	% Acierto
	0	1	2	3		
0	166	0	0	0	166	100%
1	0	0	0	0	0	-
2	0	0	0	0	0	-
3	0	0	0	0	0	-
Total	166	0	0	0	166	100
% Acierto	100	-	-	-		
Nº de Aciertos	166					
% Acierto Total	100					
ENA	0					
FA	0					

Tabla All.11: Análisis de Contingencia Modelo Ecuaciones Cassmassi Estación Parque O'Higgins para 2006

01 de abril al 16 de septiembre Observado	Pronosticado				Total	% Acierto
	0	1	2	3		
0	155	4	1	0	160	97
1	2	1	2	0	5	20
2	1	0	0	0	1	0
3	0	0	0	0	0	-
Total	158	5	3	0	156	94
% Acierto	98	20	0	-		
Nº de Aciertos	156					
% Acierto Total	94					
ENA	50.0					
FA	87.5					

Tabla All.12: Análisis de Contingencia Modelo Ecuaciones Cassmassi Estación para Pudahuel 2006

01 de abril al 16 de septiembre Observado	Pronosticado Estación				Total	% Acierto
	0	1	2	3		
0	125	30	2	0	157	80
1	4	3	1	0	8	38
2	0	0	0	0	0	-
3	0	0	0	0	0	-
Total	129	33	3	0	165	78
% Acierto	97	9	0	-		
Nº de Aciertos	128					
% Acierto Total	78					
ENA	50					
FA	92					

Tabla All.13: Análisis de Contingencia Modelo Ecuaciones Cassmassi Estación para Cerrillos 2006

01 de abril al 16 de septiembre Observado	Pronosticado				Total	% Acierto
	0	1	2	3		
0	155	6	0	0	161	96
1	5	0	0	0	5	0
2	0	0	0	0	0	-
3	0	0	0	0	0	-
Total	160	6	0	0	166	93
% Acierto	97	0	-	-		
Nº de Aciertos	155					
% Acierto Total	93					
ENA	100					
FA	100					

Tabla All.14: Análisis de Contingencia Modelo Ecuaciones Cassmassi Estación para El Bosque 2006

01 de abril al 16 de septiembre Observado	Pronosticado				Total	% Acierto
	0	1	2	3		
0	154	3	0	0	157	98
1	7	0	0	0	7	0
2	2	0	0	0	2	0
3	0	0	0	0	0	-
Total	163	3	0	0	166	93
% Acierto	94	0	-	-		
Nº de Aciertos	154					
% Acierto Total	93					
ENA	100					
FA	100					

ANEXO III

Tabla AIII.1: Análisis de Contingencia Modelo Ecuaciones Cassmassi Estación para El Bosque 2006

01 de abril al 16 de septiembre	Pronosticado				Total	Acierto
Observado	0	1	2	3		
0	140	8	0	0	148	95
1	10	5	0	0	15	33
2	1	2	0	0	3	0
3	0	0	0	0	0	-
Total	151	15	0	0	166	87
% Acierto	93	33	-	-		
Número aciertos	145					
% Acierto total	87					
ENA	61.1					
FA	44.4					