

USO DE UN SISTEMA DE PRONÓSTICOS PARA EL CONTROL DE LA CALIDAD DEL AIRE EN SANTIAGO

Ricardo Katz y María Ignacia Benítez

En este trabajo se discuten algunos aspectos relevantes de la nueva norma de calidad ambiental (relativa al material particulado respirable, PM10) promulgada por CONAMA, y del sistema de pronóstico utilizado por esta misma institución para decretar situaciones de alerta, preemergencia o emergencia ambiental. Se concluye que la confiabilidad del modelo es baja y que, por lo tanto, el instrumento utilizado, aunque necesario para una correcta gestión ambiental de la ciudad de Santiago, debe ser mejorado sustancialmente.

RICARDO KATZ. Ingeniero Civil Universidad de Chile. Master en Ciencias Universidad de Texas, San Antonio. Investigador asociado del Centro de Estudios Públicos.

MARÍA IGNACIA BENÍTEZ. Ingeniera Civil Química de la Universidad de Chile, consultora ambiental con especialización en temas de contaminación atmosférica y de gestión ambiental pública. Desde su graduación ha trabajado en ODEPLAN y como consultora en numerosos proyectos tanto públicos como privados. En la actualidad es consultora senior en Gestión Ambiental Consultores.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación se define en la Ley de Bases del Medio Ambiente como “la presencia en el ambiente de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, en concentraciones y permanencia superiores o inferiores, según corresponda a las establecidas en la legislación vigente”. A su vez, “norma primaria de calidad ambiental” se define en la misma ley como “aquella que establece los valores de las concentraciones y períodos máximos o mínimos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población”.

Tomando en consideración lo anterior, una norma de calidad ambiental (en este caso de material particulado respirable, PM10¹) define, por una parte, cuál es el ‘espacio legítimo’ de ser utilizado en las distintas actividades de la sociedad y, por otra, asegura que los niveles definidos por la norma no presentarán riesgo para la vida o la salud de las personas expuestas a ellos. Es nuestra opinión que en la actualidad no es posible cumplir con este último postulado, ya que, considerando las incertidumbres asociadas a la información epidemiológica relacionada con la contaminación atmosférica, y la variabilidad propia de las personas expuestas a la contaminación, no es posible aseverar que cualquier nivel definido no constituya un riesgo para la salud o la vida. Este aspecto es quizás uno de los temas conceptualmente más complicados y peor tratados en la Ley de Bases del Medio Ambiente. La ley debería haberse pronunciado por algún mecanismo de definición de niveles de riesgo aceptables.

Santiago está sindicada como una de las ciudades con mayores niveles de contaminación *atmosférica* a nivel mundial. Cada invierno el tema adquiere ribetes de alarma pública y, en consecuencia, la percepción de la comunidad es que las autoridades actúan con ineficacia y que la situación es cada vez peor.

Las noticias en el período de invierno (junio-agosto) abundan en imágenes de niños que acuden en gran número a centros hospitalarios, hasta colapsarlos, debido a problemas respiratorios supuestamente causados por la contaminación atmosférica y, más específicamente, por los altos

¹ Material particulado respirable es aquel con diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrones. Lo grave de este material particulado es su capacidad de ingresar al aparato respiratorio de las personas y por lo tanto de afectar la salud de las mismas.

niveles de PM10, y se cuestiona la credibilidad de las mediciones entregadas por la autoridad y los niveles fijados en la norma tanto para situaciones 'normales' como para situaciones de emergencia. Con todo, debe aclararse que la calidad ambiental de la ciudad de Santiago, en lo que respecta a la contaminación por PM10, ha mejorado. Los niveles medios mensuales de PM10 se han reducido en alrededor de un 20% en el período 1989 a 1999 y el número de episodios críticos también ha disminuido de manera relevante.

Al haber transcurrido más de un año desde su publicación, la norma de PM10 (D. S. N° 59 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia del 25.05.98) está siendo revisada actualmente, por lo que resulta interesante discutir algunos de sus aspectos relevantes.

Hay consenso en la literatura internacional sobre los efectos que causa en la salud la contaminación por material particulado respirable. En la ciudad de Santiago, la población cree que los altos niveles de contaminación por PM10 afectan gravemente la salud de los habitantes, especialmente la de los niños y ancianos. Esta creencia se ve reforzada por la presencia simultánea de altas concentraciones de partículas totales en suspensión (PTS), las que sin embargo no causan efectos nocivos en la salud.

Estudios realizados en distintas ciudades del mundo (incluida Santiago) han mostrado los siguientes resultados respecto a los efectos de la contaminación atmosférica:

- Las partículas de menor tamaño (PM10, PM2.5 y menores) son las responsables principales de daños en la salud.
- En ciudades contaminadas hay riesgo de mayores probabilidades de muerte prematura.
- Cambios incrementales de la concentración de PM10 de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, sin umbral, implican incrementos en la tasa de mortalidad diaria del orden del 1%. Para Santiago, esta cifra es de 0,6%.
- Las personas enfermas tienen mayores probabilidades de morir debido a exposiciones a la contaminación. Estas personas no necesariamente habrían fallecido de no haber estado expuestas a una atmósfera contaminada.
- Resultados de estudios efectuados en Santiago (Hospital Calvo Mackenna) estiman aumentos de casos de neumonías del orden de 18,5% que corresponderían a incrementos de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ (3 casos adicionales al día).

- Estudios realizados en el Hospital Calvo Mackenna asignan incrementos desde 6,45% hasta 15,6% en enfermedades respiratorias totales, en función de distintos escenarios de aumento de la concentración de PM10 y PM2.5. Esto implica entre 9,35 a 23 casos adicionales al día.

2. ANÁLISIS

Para efectos de análisis, una de las características principales de la norma de PM10 vigente es que define aspectos que hacían cuestionable la aplicación de las antiguas regulaciones, tales como la ubicación de estaciones monitoras, criterios de definición y excedencia de niveles de emergencia². La norma además incluye un sistema de pronóstico de la calidad ambiental y las condiciones para validarlo, así como especifica las instancias encargadas del control de episodios críticos y fiscalización de la norma.

2.1. Fondo y estructura de la norma

La norma de PM10 refleja un claro avance en la forma en que el Estado asume su rol normativo. Es así que se definen claramente una serie de conceptos relevantes y se incluyen procedimientos estadísticos tendientes a evaluar la superación de la norma. Se define la excedencia de la norma con relación al período de medición (percentil 98), se incluye un sistema de pronóstico de calidad ambiental, se hacen extensivas las situaciones de emergencia ambiental (episodios) a todo el país, y se mejoran las condiciones de representatividad de las estaciones de monitoreo. Cabe hacer presente que con anterioridad a esta norma y a la Ley de Bases del Medio Ambiente, la calidad primaria del aire estaba regulada por una Resolución Exenta del Ministerio de Salud (Res. 1.215/78), que ni siquiera había sido objeto de toma de razón por Contraloría, ni por el Decreto Supremo 185, que a diferencia de la Resolución mencionada sí había sido discutida públicamente y que representó un adelanto al incorporar criterios modernos de gestión ambiental en el tema de la contaminación atmosférica.

² Sin embargo, un punto controversial es no haber considerado una reducción en las concentraciones diarias permitidas y no haber incorporado un nivel anual de referencia. Estas dos situaciones están contempladas en la revisión que se lleva a cabo en la actualidad.

Sin perjuicio de lo anterior, se estima que la transparencia informativa por parte de las instituciones del Estado debiera mejorar de manera importante. Los resultados de la evaluación de la calidad del medio ambiente santiaguino se manejan sólo en las esferas oficiales, y no es tarea fácil acceder a ellos. Estos datos, sin embargo, debieran ser difundidos de manera transparente para que la población pueda conocer la situación real en que desarrolla sus actividades.

2.1.1. Definiciones

A continuación se discuten algunas de las definiciones de mayor relevancia expuestas en la norma, y que se relacionan con el sistema de pronóstico de episodios.

2.1.1.1. *Confiabilidad del pronóstico:*

Por confiabilidad del pronóstico se entiende el porcentaje de veces que el nivel del valor constatado en una estación de la red de monitoreo en un día determinado coincide con el nivel del valor pronosticado para esa misma estación.

Esta definición está asociada a una de las mayores innovaciones de la norma: la existencia de un sistema de pronóstico. Este sistema de pronóstico requiere de un cierto grado de confiabilidad para poder ser utilizado.

2.1.1.2. *Condiciones del sistema de pronóstico:*

La norma plantea que el sistema de pronóstico debe cumplir a lo menos dos condiciones:

- a) Entregar el valor máximo de concentración de 24 horas esperado para el día siguiente en cada una de las estaciones de monitoreo de calidad del aire³.
- b) Que la confiabilidad de pronóstico, durante su período de validación, sea superior al 65%.

³ Es importante destacar que dado que el sistema de pronóstico se utiliza en situaciones de episodios críticos, la confiabilidad en el mismo se evalúa contra la predicción por tramos de contaminación, en que la amplitud del primer tramo, que varía entre 195 y 239, es de $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que corresponde al 90% de la norma anual para Estados Unidos. La amplitud del segundo tramo es de $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$, equivalente al 60% de la norma diaria chilena. Esta amplitud permite subsanar la imprecisión del modelo.

Esta definición se debe analizar bajo dos situaciones. La primera fue relevante durante el período de validación del modelo (es decir, cuando los valores constatados por el modelo predictivo no presentaban alteraciones debido a la adopción de medidas) y la segunda durante el período de operación del modelo (es decir, cuando los eventos observados están influenciados por la implementación de medidas —falsos positivos—). Es importante tomar en cuenta que la utilización del modelo predictivo no permite asegurar que la evaluación de su eficacia sea independiente de las acciones de control implementadas, como se puede observar en la Tabla N° 1.

TABLA N° 1

Predicción	Evento posible	Comentarios
1. Preemergencia (nivel 2), por lo tanto se gatillan acciones de control de emisiones.	Preemergencia.	No necesariamente hay coincidencia, porque podría haber correspondido a emergencia, en la ausencia de medidas.
	Emergencia. Alerta o inferior.	No hay coincidencia ^a . No hay coincidencia ^b .
2. Emergencia (nivel 3), por lo tanto se gatillan acciones de control de emisiones.	Emergencia.	Coincidencia de nivel.
	Preemergencia. Alerta (nivel 1 ó inferior).	Ver a) y b). Ídem.
3. Alerta o inferior (no se implementan acciones de control de emisiones).	Emergencia.	No hay coincidencia. Ver a) y b).
	Preemergencia. Alerta o inferior.	No hay coincidencia. Ver a) y b). Coincidencia de nivel.

a) Aunque no hay coincidencia, de acuerdo a la definición de la norma, es posible argumentar que el modelo predijo una situación ‘más desfavorable’ (sucedió en la presencia de medidas de disminución de emisiones) y por lo tanto puede ser considerada una ‘coincidencia favorable’, pero desde una perspectiva legal sería adecuado adaptar la definición a este tipo de situaciones.

b) Se produce un ‘falso positivo’; es decir, no es posible aislar el hecho de que el modelo predijo en forma errada que las medidas implementadas fueron eficientes en ‘evitar’ la preemergencia. Lo correcto sería introducir en la fórmula de verificación de confiabilidad una corrección (obtenida del período de validación) por falsos positivos. De otra manera, se estaría sobreestimando la confiabilidad del modelo.

Cabe destacar que la definición de confiabilidad de pronóstico en la norma estableció que, para efectos del cálculo de la confiabilidad, se entenderá como un nivel más el correspondiente a concentraciones de 24 horas inferiores a $195 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esto implica que un modelo diseñado para tomar acciones de control de episodios de alta contaminación es validado en rangos donde no será utilizado. El análisis de la legislación da la impresión de que este nivel se incluyó solamente para efectos de validación del modelo y, por lo tanto, corresponde a un artificio estadístico para lograr los niveles mínimos de confiabilidad que la misma legislación demanda, y no a la necesidad de contar con un instrumento con la confiabilidad requerida.

Lo anterior es, a nuestro juicio, un aspecto que debe ser revisado y redefinido, ya que lo que interesa es que el modelo sea confiable para los niveles 2 (preemergencia) y 3 (emergencia), que son los niveles donde se aplican medidas. El número de días en que la calidad ambiental cae en los tramos 2 y 3 es, a lo más, del orden de 20 por estación (y en los casos de Las Condes y Providencia 1 ó 2 días al año). Dado que la cantidad de días que presentan niveles de concentraciones bajas es muy superior a la de los días de episodios críticos, la determinación de la confiabilidad del modelo es claramente sesgada hacia concentraciones donde no se implementan medidas adicionales de control de emisiones.

El manejo de episodios críticos en Santiago (de hecho, en la Región Metropolitana), tanto desde el punto de vista de predicción de éstos como de acciones de reducción de emisiones, debe ser revisado en forma transparente y a la brevedad para aumentar su eficacia (la que con la información disponible parece ser baja) y reducir los costos sociales y privados.

A modo de ejemplo, en la estación F (avenida La Paz), durante el período de validación del modelo predictivo (7 de abril al 17 de septiembre de 1997) se registraron aproximadamente 18 días en los cuales la calidad ambiental cayó a los niveles 2 ó 3, de manera que hubo alrededor de 142 días en que se mantuvo en el nivel 1 ó 0. De la información disponible no es posible determinar exactamente cuántos días, de esos 18, predijo el modelo correctamente esas situaciones. Pero si suponemos un 85% de acierto en nivel 1 ó 0 y un 25% en niveles 2 y 3, el modelo entregaría una tasa total de aciertos de 78% y, por lo tanto, podría ser utilizado para predecir episodios críticos e implementar medidas de control, tales como detener el 50% de las emisiones industriales y establecer una restricción vehicular de hasta 80%, con una confiabilidad efectiva para el tramo que interesa (2 y 3) de sólo un 25% y aun menor.

En conclusión, se estima que el modelo —con confiabilidades cercanas al 65% definido por las autoridades, para los períodos en que real-

mente interesa que sea confiable, sobre todo teniendo en cuenta que los niveles 2 y 3 implican medidas restrictivas que involucran un costo para toda la sociedad— no se encuentra lo suficientemente validado.

Si además se considera que sólo se requirió un año de validación con un máximo de 20 días al año por estación (en los casos de Las Condes y Providencia, 1 ó 2 días al año), en que la calidad ambiental cae a los tramos 2 y 3, se concluye que el período de validación que se consideró fue insuficiente.

El índice de calidad del aire por material particulado (ICAP) es probablemente uno de los indicadores más utilizados en nuestra ciudad (y por ende en nuestro país) y a su vez, quizás, uno de los menos comprendidos. El ICAP es una construcción matemática que tiene por objetivo expresar situaciones de contaminación ambiental medidas en unidades de ingeniería ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y que, por lo tanto, requiere conocimiento de las normas para evaluar la seriedad de la situación, en términos coloquiales⁴. Este índice resulta de la aplicación de una función lineal segmentada que en la Tabla N° 2 está definida por tres puntos:

TABLA N° 2

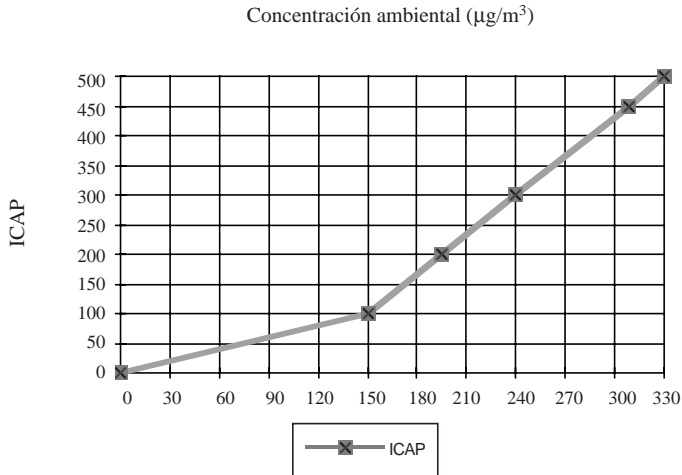
ICAP	PM 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 horas)
0	0
100	150
500	330

El valor 100 del índice corresponde a la norma y el valor 500 a la concentración que causaría muertes incrementales (valor, por cierto, de gran controversia).

Los valores intermedios se interpolan linealmente, como se muestra en Gráfico N° 1.

⁴ Como el nivel de la norma para cualquier contaminante se estandariza en 100 (bueno), por lo tanto no se requiere saber que la norma para PM10 es de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; la de SO₂ 365 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y así sucesivamente.

GRÁFICO N° 1 ICAP: FUNCIÓN LINEAL SEGMENTADA



La ecuación del ICAP corresponde a $\text{ICAP} = 0,67 \text{ Ca}$ para $\text{Ca} > 0 < 150$ e $\text{ICAP} = 2,22 \text{ Ca} - 233$ para $\text{Ca} > 150$.

2.1.2. Definición de niveles de emergencia

La norma de calidad del aire por PM10 incluye, como se especifica en la Ley 19.300, la definición de los niveles para los cuales se decretan situaciones de emergencia ambiental. Dado que la aplicación de estos niveles es de carácter nacional, es relevante discutir sus alcances. Los niveles de emergencia ambiental quedan definidos por los valores que se presentan en la Tabla N° 3.

TABLA N° 3

Nivel	PM 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 horas)	ICAP
Nivel 1 (alerta)	195-239	>200 y <300
Nivel 2 (preemergencia)	240-329	>300 y < 500
Nivel 3 (emergencia)	330 ó superior	500 y +

La revisión de los antecedentes entregados por CONAMA⁵ permite concluir que, en base a la experiencia internacional analizada, no estaría justificada una baja en los actuales niveles para definir situaciones de emergencia en el país.

A continuación se muestra una comparación de las concentraciones que dan origen a los distintos niveles de episodios críticos en distintos lugares del mundo (Tabla N° 4). Para efectos de comparación, se presentan los valores en concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$) y en el equivalente ICAP de Santiago.

TABLA N° 4

Estados de emergencia ambiental*	EPA	Equivalencia en Chile	California	Equivalencia en Chile	México	Equivalencia en Chile
	($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)	ICAP	($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)	ICAP	($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)	ICAP
Alert level/Stage I	350	544	350	544		
Warning level/Stage 2/Fase I	420	700	420	700	319	476
Emergency level/Stage 3/Fase II	500	878	500	878	431	724

* Se listan en orden correlativo y separados por *slash*, los distintos estados de emergencia para la EPA, California y Valle de México.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos, en su mayor parte, de CONAMA.

Las medidas de control de emisiones (restricción vehicular, disminución de emisiones, suspensión de actividades escolares, etc.) establecidas para la situación de alerta (ICAP 200) en Santiago, son equivalentes a Alert/Stage I. Las medidas establecidas para preemergencia en Santiago (ICAP 300), son equivalentes a Warning/Stage 2/Fase I. Las medidas establecidas para la situación de emergencia en Santiago (ICAP 500) son equivalentes a Emergency level/Stage 3/Fase II, pero como se observa en la Tabla N° 4, en Santiago se implementan estas acciones de control a niveles equivalentes (ICAP) muy inferiores a los utilizados en otros países (Méxi-

⁵ “Antecedentes técnicos para la revisión de los niveles que definen situaciones de emergencia por material particulado respirable”, documento del expediente de CONAMA relativo a la revisión de la norma de PM10.

co) y por la EPA y agencias estatales (California) en Estados Unidos. De hecho, el ‘alerta’ EPA se decreta a un ICAP 544 (más de 2,5 veces superior al caso de Santiago). Una situación similar se da para la preemergencia (2,3 veces superior al caso de Santiago) y emergencia (1,7 veces superior al caso de Santiago).

2.1.3. Modelo predictivo y metodología de monitoreo

La norma de PM10 promulgada en 1998 creó un sistema de pronóstico de la contaminación atmosférica por PM10 para poder implementar las acciones de disminución de emisiones durante el mismo día del episodio (preemergencia o emergencia) y no un día después⁶. Los valores medidos hasta las 10 am de un día sirven para implementar medidas el día siguiente, por lo que con una concentración ambiental medida entre las 10 am del día 1 hasta las 10 am del día 2, se implementan acciones el día 3, cuando, posiblemente, dada la alta variabilidad de las condiciones meteorológicas, ya han perdido toda su eficacia.

Por lo anterior, la norma estipula las características y condiciones que deben cumplir las metodologías de pronóstico para poder anticipar las acciones de control. Estas condiciones y características se analizan a continuación, al igual que la descripción del modelo que se utiliza para el caso de la Región Metropolitana.

El modelo que se usa para decretar emergencias o preemergencias en la Región Metropolitana presenta las siguientes características⁷:

- Utiliza la media móvil de 24 horas, evaluada a las 17.30 como indicador del nivel basal de concentraciones para el día siguiente. El uso de valores posteriores a las 17.30 mejoraría la confiabilidad del modelo, pero empeoraría el plazo de implementación de medidas.
- Corrige la concentración basal por variación de emisiones, en función del día de la semana. Por ejemplo, domingo es -26% , y día laboral no lunes es $+3\%$.

⁶ La calidad del aire se mide durante 24 horas seguidas (entre las 10 am del día 1 y las 10 am del día 2). Esta medición es reportada como representativa del día 2, lo que obviamente tiende a entregar información con sesgos en función de la localización y del régimen de vientos de las estaciones en Santiago. En la zona oriente de Santiago, el grueso de la contaminación está presente entre las 10 am y la hora 0, por lo que la contaminación medida es representativa del día 2; en cambio en la zona poniente de Santiago, donde la contaminación se concentra durante la noche y la madrugada, sería representativa del día 1.

⁷ Datos obtenidos del documento técnico del expediente de revisión de la norma de PM10, “Condiciones para el uso de pronóstico de contaminación atmosférica en la definición de situaciones de emergencia ambiental” (CONAMA, 1997).

- Corrige el nivel basal de concentraciones de un ponderador 'p' que tipifica las condiciones de dispersión esperadas⁸ para las próximas 24 horas. El ponderador 'p' varía entre -2 y +2. Según comunicaciones de CONAMA, el PMCA es representativo (no se conoce el período durante el cual fue evaluado ni el nivel estadístico de representatividad que tiene) del período abril-agosto y particularmente para mayo a julio, en el entorno de las estaciones del sector surponiente de la Región Metropolitana (no se sabe qué pasa con la nueva estación ubicada en Pudahuel, que es la que en la actualidad estaría presentando los niveles de concentración ambiental más altos).
- El modelo corrige el valor basal por tendencia de las concentraciones, considerando la variación de la pendiente observada de la media móvil de 24 horas evaluada a las 17.30, con respecto al valor de las 16.30 horas.

En resumen, el modelo consiste en:

i. Obtención de la tendencia del PMCA⁹ a partir de 5 niveles (bajo, regular bajo, regular, regular alto y alto):

Tipificación de la tendencia	Descripción	'p'
Si $PMCA_{t+1} = PMCA_t$	Mantención condiciones de dispersión	0
Si $PMCA_{t+1} > PMCA_t$ en 1 nivel	Empeoramiento	+1
Si $PMCA_{t+1} > PMCA_t$ en 2 niveles	Gran empeoramiento	+2
Si $PMCA_{t+1} < PMCA_t$ en 1 nivel	Mejoría	-1
Si $PMCA_{t+1} < PMCA_t$ en 2 niveles	Gran mejoría	-2

(Fuente: CONAMA, Región Metropolitana.)

ii. Obtención de la concentración por estación a las 17.30 horas (dato, no estimación):

$$Conc_{t,i} \text{ (t=hoy, i=estación)}$$

⁸ Tipificación de los rangos asociados al Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA). Este ponderador no sólo incluye aspectos cuantificables de manera objetiva, sino una apreciación técnica experta. Por lo tanto, son condiciones esperadas, no constatadas.

⁹ Debe recordarse que el PMCA es el que depende de la apreciación experta.

(Continuación)

iii. Corrección por proyección de emisiones (Q):

$$\text{Conc}_{t+1,i} \text{ preliminar} = \text{Conc}_{t,i} \times (1 + Q_{t,t+1}/100)$$

T	t+1	Q _{t,t+1} (%)
Día laboral	Día laboral	+3
Viernes	Sábado	-3
Sábado	Domingo	-26
Domingo	Lunes	+26
Día laboral	Feriado	-26
Feriado	Día laboral	+26
Feriado	Feriado	+3

(Fuente: CONAMA, Región Metropolitana.)

iv. Obtención de tendencia de concentraciones.

Comparar la media móvil de 24 horas para las 16.30 con la de las 17.30.

- Pendiente creciente : (+)
- Pendiente decreciente : (-)
- Pendiente nula : (=)

En función de lo anterior, el pronóstico definitivo por estación se obtiene de la siguiente manera:

Si pendiente es (+) o (=) ==> Concentración máxima pronosticada:

$$\text{CONC}_{t+1, i, \text{ pronosticada}} = (\text{Conc}_{t+1,i} \text{ preliminar}) + p \times 45$$

Si pendiente es (-) ==> Concentración máxima pronosticada:

$$\text{CONC}_{t+1, i, \text{ pronosticada}} = (\text{Conc}_{t+1,i} \text{ preliminar}) + (45/2) \times (\text{TRUNCAR} ((p \times 1.5); 0))$$

La norma estipula qué se entenderá por ‘metodología de pronóstico de calidad del aire’. Los puntos que se exigen son:

1. Que entregue un valor esperado en concentración ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$) que corresponda al máximo promedio móvil de 24 horas para al menos las siguientes 24 horas. Dicho valor deberá entregarse para la estación de monitoreo de calidad del aire, clasificada como “para evaluación de exposición humana”, que haya registrado la mayor frecuencia de superaciones de los más altos niveles que definen situaciones de emergencia durante el último año.
2. Que brinde una confiabilidad del pronóstico que sea superior al 65%.

Un modelo con una confiabilidad del 65% es sólo un poco mejor que tirar una moneda (50%). A esto debe sumarse el hecho de que la confiabilidad del modelo es función del tiempo (año o años) durante el cual se validó, con la variabilidad típica de las condiciones meteorológicas¹⁰. Esto además implica que las medidas se implementarán, sin efectos positivos, 1 de cada 3 veces. Esta situación debe verse reflejada en el cálculo de los beneficios (beneficios x 0,65 vs. costos x 1).

A nuestro juicio, la situación real es peor que un 65%, dado que la confiabilidad del pronóstico debería ser evaluada por tramo de aplicación, según se discutió anteriormente en el punto 2.1.1.1.

La norma plantea que, con respecto a las condiciones de operación de una metodología de pronóstico de calidad del aire, éstas podrán ser modificadas por la autoridad sanitaria en consideración a nuevos antecedentes que contemplen mejoras, por ejemplo, en la capacidad de predicción o en la extensión geográfica involucrada. Debe acotarse esta discrecionalidad, ya que se puede terminar alterando la norma con los cambios en la metodología de pronóstico de calidad del aire. Estas modificaciones deberán efectuarse, a lo menos, por medio de una resolución fundada y que se publique en el *Diario Oficial*.

Se plantea en la norma que en caso de que durante la operación de una metodología de pronóstico se corroboraren resultados sostenidamente

¹⁰ La variabilidad típica de las condiciones meteorológicas debería implicar que la confiabilidad posterior del modelo (la que, como se explicará, no es posible de verificar) sea incluso menor que 65%.

inferiores a la confiabilidad del pronóstico establecida, durante a lo menos un tercio (1/3) del período de uso del pronóstico en el año, la autoridad competente podrá no seguir usando esa metodología si lo estima pertinente.

Éste es un aspecto sumamente conflictivo. Hay una inconsistencia en el hecho de que se defina una confiabilidad mínima de 65% y se le otorgue a la autoridad sanitaria la facultad discrecional de continuar o no con el uso de la metodología “si lo estima pertinente”. Ya la confiabilidad de 65% es baja. Por ningún motivo debería permitirse el uso de otro modelo con confiabilidades aun inferiores. Aunque, como hemos señalado, eso se hace reiteradamente en Santiago.

Sin perjuicio de lo anterior, debe revisarse la manera en que se evaluará la confiabilidad del modelo que está operando. Como se observa en la Tabla N° 1, donde se presenta la predicción y los eventos posibles, la cantidad de falsos positivos que se generan es alta, y por lo tanto, hay alto riesgo de estar permanentemente sobreestimando la eficiencia del modelo.

3. CONCLUSIONES

La norma primaria de calidad del aire vigente para PM10 es de 150 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$, como concentración media aritmética diaria. Este valor cae dentro de los valores considerados internacionalmente. Sin perjuicio de lo anterior, la tendencia normativa actual es hacia la incorporación de normas para partículas con diámetro aerodinámico inferior a 2,5 μ . Mucho más estricta que la norma diaria sería la inclusión de una norma anual (de hecho, en Estados Unidos esa norma es 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$). Este aspecto se está discutiendo en la actualidad y la inclusión de un valor anual parece un hecho, sin que esté claro aún qué forma tomará la norma. Dado que la evidencia de mortalidad incremental debida a contaminación por PM10 es bastante sólida, la manera apropiada de poder determinar cuál nivel es el apropiado sería mediante un análisis de costos en salud y en control.

La conclusión entregada por CONAMA relativa a los niveles en los cuales se decretan medidas de preemergencia o de emergencia es que, con base en la experiencia internacional, no estaría justificada una baja en los actuales niveles para definir situaciones de emergencia en el país. Si se pretende, al igual que en California, incluir el uso de una herramienta de pronóstico, la propuesta de bajar los niveles se justificaría aún menos.

Dado que políticamente sería muy difícil hacer más laxos los niveles a los cuales se decreta preemergencia y emergencia, estos niveles deberían

mantenerse y, complementariamente, utilizarse un sistema de pronóstico adecuado.

Se debe tener presente que el hecho de decretar medidas con un nivel alto de incertidumbre castiga a los afectados en situaciones en que el instrumento predictor falla, ya que se incurre en costos que no reportarían sus correspondientes beneficios.

La información disponible no nos ha permitido determinar cuántos episodios (preemergencias y emergencias) podrían haberse predicho de haberse utilizado el modelo predictivo. Esta información es imprescindible para poder determinar los efectos reales de la regulación.

La inclusión de un sistema de pronóstico para la gestión de episodios críticos de contaminación por material particulado respirable (PM10) es un gran avance, ya que permite incluir el concepto de prevención y, por lo tanto, reaccionar antes de que se generen efectos nocivos en salud. El trabajar con modelos predictivos requiere modificar los análisis de costos y beneficios para incorporar el concepto de valor esperado. De otra manera, se estarán comparando valores no comparables. Lo anterior es muy importante, ya que los costos en que se incurren, que representarían un nivel de 100%, sólo reportarían beneficios con un nivel de 65% (asumiendo que ésta es la confiabilidad de la predicción).

Para que el modelo de pronóstico sea una herramienta efectiva, debe ser confiable en los tramos 2 y 3 (preemergencia y emergencia), que son los tramos que implican aplicación de medidas restrictivas. De la información disponible no se puede deducir la confiabilidad del modelo en esos tramos. Esto es indispensable para que el modelo cumpla con el objetivo de ser una herramienta técnica y no política. Sin perjuicio de no poder evaluar la confiabilidad precisa del modelo, la metodología utilizada por las autoridades debe ser corregida para efectos de estimar las eficiencias reales para los tramos que interesan, es decir donde se implementan medidas de control de emisiones. □