

Cuantificación económica de los beneficios en salud asociados a la reducción de la contaminación por PM_{10} en Concepción Metropolitano, Chile

CRISTIAN MARDONES^{1,a}, ANDRÉS SAAVEDRA^{1,b}, JORGE JIMÉNEZ^{2,c}

Health and economic benefits of reducing 10 μm particulate matter (PM_{10}) in Metropolitan Area of Concepción, Chile

Background: Several international studies show the effects of PM_{10} pollution on health but specific analyses for many cities in Chile are lacking. **Aim:** To relate PM_{10} concentrations to effects with population health and quantify the economic benefits of its reduction in Concepción Metropolitan Area. **Material and Methods:** Poisson regression and generalized additive models were used to analyze the short-term effects of PM_{10} on mortality and morbidity, controlling for lags, seasonal, trend and weather variables. The damage function method to determine the economic impact of pollution reduction was used. **Results:** The selected concentration-response (C-R) coefficients showed that PM_{10} concentrations had effects on hospital admissions with a two days lag for respiratory diseases in children under 15 years of age and with a one day lag for asthma in patients over 64 years. The effects on premature mortality had a six days lag. The decrease in 1 $\mu g/m^3$ of PM_{10} concentration would generate benefits ranging from 1,025.8 to 32,490.9 million of Chilean pesos per year, with a confidence level of 95%, according the estimation based on concentration-response coefficients and their economic cost. **Conclusions:** Reduction of PM_{10} would have important health and economic benefits.

(Rev Med Chile 2015; 143: 475-483)

Key words: Air pollution; Mortality; Particulate matter; PM_{10} ; Respiratory disease.

Las mediciones en las estaciones de monitoreo llevaron a que en 2006 se declarara zona latente por material particulado respirable (MP_{10}) a Concepción Metropolitano; y que posteriormente, en el año 2011, se aprobara el Anteproyecto del Plan de Prevención Atmosférico para las comunas del Concepción Metropolitano, el cual incorpora medidas que buscan evitar que se supere la norma para este contaminante.

Esta situación es preocupante ya que diversos estudios internacionales han relacionado la mortalidad, los problemas cardiovasculares y las

enfermedades respiratorias con la contaminación del aire¹. También se ha investigado el material particulado fino y sus efectos sobre la morbilidad² y mortalidad³. Sin embargo, no es sólo la concentración la que produce daños sino que también la composición afecta el estado de salud de las personas⁴. En Santiago de Chile, se logró asociar la muerte prematura a la contaminación vehicular⁵, y también se concluyó que las concentraciones "aceptables" para la mayoría de la población no resultan ser adecuadas para los más ancianos⁶. En la ciudad de Temuco también se encontró una

¹Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

²Departamento de Ingeniería Industrial y Centro de Ciencias Ambientales EULA, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

^aDoctor en Economía.

^bCandidato a Magíster en Ingeniería Industrial.

^cMaster of Science in Environmental Science.

Ph.D. in Civil Engineering.

Recibido el 1 de agosto de 2014, aceptado el 30 de marzo de 2015.

Correspondencia a:
Cristian Mardones P.,
Edmundo Larenas 219,
Concepción, Chile.
Teléfono: 56-41-2203614.
crismardones@udec.cl

asociación entre contaminación diaria por MP_{10} y mortalidad por causas respiratorias, cardiovasculares y cardiorrespiratorias⁷.

En este trabajo, los efectos de la concentración de MP_{10} sobre la mortalidad y morbilidad son estudiados de forma desagregada según causa y por rango etario con distintos modelos estadísticos. Luego, se valorizan económicamente los efectos en la salud de variaciones en las concentraciones diarias de MP_{10} . Estos beneficios económicos provienen casi en su totalidad de las muertes prematuras evitadas, y en mucho menor magnitud, por el ahorro asociado al tratamiento de enfermedades respiratorias.

Específicamente, para la evaluación económica de los beneficios en salud se utiliza el método de la función de daño, el cual ha sido utilizado en Chile para evaluar diversos planes de descontaminación⁸ (Cifuentes L. Generación de Instrumentos de Gestión Ambiental para la Actualización del Plan de Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana de Santiago al Año 2000. Santiago, Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile. Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas, Diciembre 2000 y DICTUC. Análisis General del Impacto Económico y Social de la norma de calidad del aire por $MP_{2,5}$. Santiago 2010). Las etapas del método de la función de daño son las siguientes: las emisiones de las distintas fuentes contaminantes se traducen en concentraciones sobre una localidad; existe una población expuesta que

sufre los efectos de las concentraciones ambientales; luego, para relacionar las concentraciones con los efectos en la salud, se utilizan las funciones concentración-respuesta (C-R); finalmente, se pueden calcular los beneficios generados a partir de los daños evitados en mortalidad prematura y morbilidad debido a la reducción en las concentraciones del contaminante.

Material y Método

Estudio epidemiológico

La relación entre los niveles de concentraciones y los efectos sobre la salud se establece a través de las funciones concentración-respuesta (C-R). Estas funciones se obtienen, por lo general, de estudios epidemiológicos de series de tiempo, de cohorte, o de sección transversal. Los estudios de series de tiempo relacionan estadísticamente los cambios temporales (por lo general diarios) en la incidencia de efectos en la población de una ciudad con los cambios en la concentración de un contaminante. La población expuesta a través del tiempo actúa como su propio control estadístico. Sin embargo, para establecer la función C-R se requiere condicionar por variables confunderes, como los datos meteorológicos, pues varían de forma diaria al igual que la contaminación. Dada la información disponible esta investigación tiene carácter de serie de tiempo.

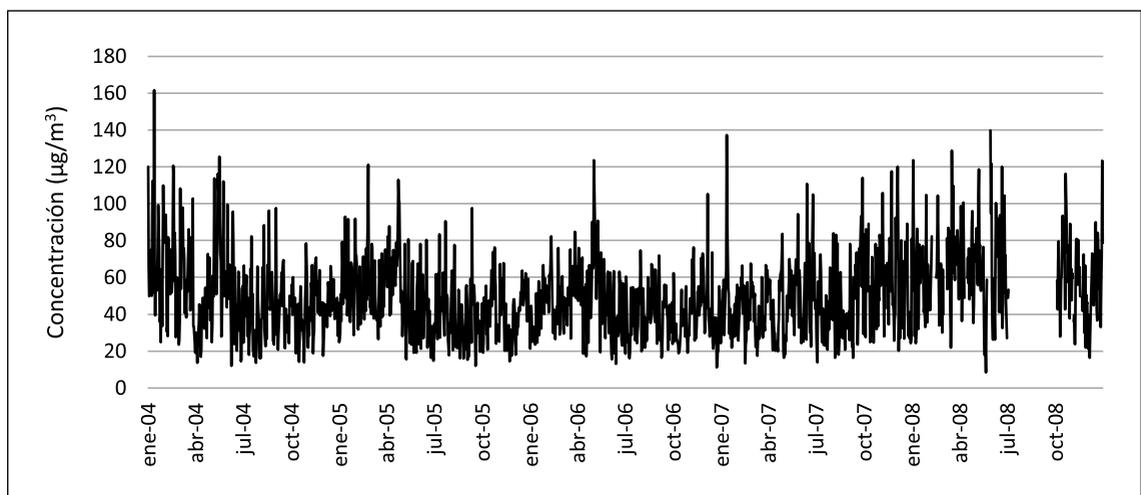


Figura 1. Concentraciones diarias MP_{10} Concepción Metropolitana 2004-2008. Fuente: Elaboración propia en base a SINCA.

Para definir los grupos vulnerables, las causas de enfermedades y mortalidad prematura, confundentes, modelos estadísticos y consideraciones más frecuentemente aplicados, se realizó una revisión de distintas investigaciones epidemiológicas internacionales y nacionales, un resumen de las más relevantes se puede observar en la Tabla 1.

A partir de esta revisión se decidió utilizar los modelos de regresión Poisson y GAM (Modelo Aditivo Generalizado), también, se determinó que no existe un agrupamiento etario único en las distintas investigaciones, por lo cual se consideraron los grupos más frecuentemente utilizados, estos son mayores de 64 años, de 64 a 15 años, y los menores de 15 años. Los efectos sobre la salud más estudiados son las muertes no accidentales (excluye sólo V00-Y98 del ICD-10), respiratorias (I00 a I99) y cardiovasculares (J00 a J99); que son incluidas en este estudio junto con las causas digestivas como control (K00 a K93). Además, se decidió analizar un nivel de desagregación mayor de enfermedades, que consideran asma (J45), bronquitis aguda (J20), enfermedades cardíacas isquémicas (I20 a I25) y cirrosis hepática alcohólica (K703), esta última también como control.

La información disponible junto con la revisión bibliográfica permitió definir las variables para realizar los análisis estadísticos (Tabla 2). Específicamente, se reunieron datos meteorológicos, concentraciones de MP₁₀, ingresos hospitalarios y de muertes diarias ocurridas en Concepción Metropolitana.

Los datos meteorológicos fueron obtenidos de la Dirección Meteorológica de Chile (registrados en el aeropuerto Carriel Sur) e incluyen registros diarios de temperatura, humedad, velocidad del viento y lluvia.

La información de las concentraciones diarias de MP₁₀ provienen de las estaciones de monitoreo del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) entre los años 2004 y 2008. Los datos diarios de mortalidad e ingresos hospitalarios por enfermedades, se obtuvieron del Departamento de Estadísticas e Información de Salud (DEIS) del Ministerio de Salud. En la Tabla 3 se presentan a modo de resumen los totales anuales para cada uno de los efectos estudiados.

Se puede observar que la mayor cantidad anual de casos de mortalidad se presenta en las personas mayores de 64 años, y que a mayor desagregación por tipo de causa existen menos casos. Para los

ingresos hospitalarios por enfermedades respiratorias, la mayoría de casos son atribuidos a las personas menores de 15 años, mientras para los ingresos por enfermedades al sistema respiratorio y circulatorio, las personas mayores de 64 años presentan cifras similares al grupo entre 15 y 64 años, aunque representan una menor población.

Para generar una asociación entre el MP₁₀ y los efectos en la salud se requieren utilizar modelos estadísticos. Los modelos de regresión Poisson pertenecen a los Modelos Lineales Generalizados (GLM) y se pueden representar de la siguiente forma:

$$\log(\text{efecto}) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i * \text{variable}_i + \beta * \text{MP}_{10} + e$$

Por otra parte, los modelos GAM permiten evaluar efectos no lineales al incluir las variables explicativas como funciones alisadas llamadas *splines*. En este estudio son incluidas las variables meteorológicas en *splines* con tres grados de libertad, excluyendo la lluvia que tiene carácter binario. Estos modelos se puede representar como:

$$\log(\text{efecto}) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{n-m} \alpha_i * \text{variable}_i + \sum_{i=n-m}^n \alpha_i * f_i(\text{meteo}_i) + \beta * \text{MP}_{10} + e$$

Para la estimación de estos modelos se utiliza el protocolo APHEA (*Air Pollution and Health European Approach*) en el cual las variables de interés se incluyen de manera secuencial, en la medida que cumplan con tener un valor-p menor a un valor crítico (en este estudio es 0,15), luego si la variable asociada a la contaminación aún se conserva y tiene un valor-p menor a 0,05 se considera que existe una relación estadística entre la salud y la contaminación.

A partir del coeficiente C-R asociado al MP₁₀ es posible estimar el riesgo relativo (RR_{ij}) de la causa i en el grupo de población j , el cual se calcula de la siguiente forma:

$$RR_{ij} = \exp(\beta_{ij} * \Delta \text{MP}_{10})$$

Para validar los coeficientes C-R calculados, se definieron algunos criterios de selección. Primero, sólo fueron seleccionados aquellos coeficientes que tuvieran un nivel de significancia menor a 5%. Segundo, se escogieron aquellos coeficientes que arrojan un riesgo relativo (RR) entre 1 y 2, ya que para fuera de este rango de valores no es razonable atribuir efectos de la contaminación sobre la salud. Finalmente, se puede incluir un criterio

Tabla 1. Revisión de metodologías en diversos estudios epidemiológicos

Fuente	Metodologías	Contaminante	Tendencia	Estacionalidad	Rezago	Meteorología	Método APHEA	Alisado y ajuste
Beverland et al. (2013)	Modelos lineales generalizados (Poisson, GLMs)	Smog u hollín (proxym del MP)	-	Día de la semana, estación	De 0 a 30 días para contaminante y temperatura	Temperatura	Menciona	Ajusta función de temperatura con 7 grados de libertad
Valdés et al. (2012)	Regresión Poisson y Modelo Aditivo Generalizado (GAMs)	MP ₁₀ y MP _{2,5}	Considera	Día de la semana	Considera para contaminante y variables meteorológicas	Temperatura, humedad relativa	-	Ajusta funciones de humedad y temperatura con 3 grados de libertad
Chen et al. (2011)	Modelos jerárquicos bayesianos de dos etapas y Regresión Poisson	MP ₁₀	Considera	Días de la semana	De 0 a 7 días	Temperatura y humedad relativa	-	-
Revich et al. (2009)	Modelo bivariado lineal generalizado	MP ₁₀	Menciona	Menciona	Considera, 0 días tuvo mayor correlación	temperatura	-	temperatura modelada con 6 grados de libertad
Samoli et al. (2008)	Análisis de 2 etapas: Modelos de Regresión Poisson y Enfoque de Meta-Regresión	MP ₁₀	Sugiere incluir	Considera, día de la semana y días de vacaciones	0 a 2 días para temperatura y contaminante	Temperatura, humedad relativa	Revisa coherencia entre estudios europeos y norte americanos	Funciones para controlar la estacionalidad de la mortalidad: 3, 8 y 12 grados de libertad; para la temperatura se usaron 3 grados de libertad
Cakmak et al. (2007)	Regresión Poisson	MP ₁₀	Considera	Considera	De 0 a 5 días para contaminante	Considera	-	-
Pope y Dockery (2006)*	Regresión Poisson; Modelos Aditivos Generalizados (GAMs)	MP ₁₀	Menciona	Día de la semana, estación	Menciona	Temperatura, humedad relativa	Menciona	Alisado paramétrico y enfoques de ajuste para meteorología
Sanhueza et al. (2006)	Modelo de Regresión Poisson multivariable	MP ₁₀	Considera	Considera	Considera para contaminante	Velocidad y dirección del viento, humedad relativa y temperatura	Considera	-
Cifuentes et al. (2000)	Modelo lineal generalizado (Poisson), Modelo aditivo generalizado y Modelo aditivo generalizados con datos filtrados	MP _{2,5}	-	Día de la semana, vacaciones, mes, seno y coseno	De 0 a 5 días	Temperatura y humedad relativa	-	Función para temperatura y humedad con 8 grados de libertad

*Son Artículos con carácter de revisión. Menciona: Se refiere a que se trata en el documento pero no especifica si está en el modelo. Considera: Está incluida en el modelo. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Variables utilizadas en los modelos

Carácter	Variable	Descripción
Contaminante	MP10	Concentraciones diarias de MP ₁₀
Rezagos	MP10_1a1, MP10_1a2, MP10_1a3, MP10_1a4, MP10_1a5, MP10_1a6, MP10_1a7, MP10_1a8, MP10_1a9, MP10_1a10	Concentraciones de MP ₁₀ considerando rezagos de 1 a 10 días
Meteorología	temp* humedad* velviento* lluvia	Temperatura media diaria (grados Celsius) Humedad relativa diaria (%) Velocidad promedio del viento diaria (km/h) 0 o 1, si ha llovido o no ese día
Estacionalidad	feriado l, m, x, j, v, s, d ene, feb, mar, abr, may, jun, jul, ago, sep, oct, nov, dic	Si determinado día es feriado Son los días de la semana Meses del año
Causas**	na_q i_q j_q k_q isq_q bro_q asm_q k703_q	No accidental Sistema circulatorio Sistema respiratorio Sistema digestivo Isquemia del corazón Bronquitis aguda Asma Cirrosis hepática alcohólica
Tendencia	t t_2 senk cosk	Controla la estacionalidad lineal de los datos Controla la estacionalidad exponencial (t ²) Controla la estacionalidad sinusoidal de la forma sin (2kπt/365), donde k asume valores de 1 a 6 Controla la estacionalidad cosenoideal de la forma cos (2kπt/365), donde k asume valores de 1 a 6

*Para estas variables en los modelos GAM se van a introducir como si fueran funciones con 3 grados de libertad (g.l.). **Para las causas "q" corresponderá a: tot (todos los casos), 15 (casos de menores de 15 años), 40 (casos entre 15 y 64 años) y 64 (casos de mayores de 64 años). Fuente: Elaboración propia.

adicional de exclusión en el caso de los ingresos hospitalarios, ya que si existen efectos para el cual se tiene más de un coeficiente C-R que cumple con el nivel de significancia y el rango de RR, pero que pertenecen a distintos niveles de desagregación, para no doble contabilizar los efectos se escoge aquél de mayor desagregación.

Evaluación Económica de Beneficios en Salud

Para el cálculo de beneficios se utiliza el método de la función de daño que consiste en una secuencia de modelos epidemiológicos y de valoración económica.

En primer lugar se utilizan modelos que vinculan los efectos de un cambio diario en la concentración de MP₁₀ sobre la salud de la población expuesta. Así, las funciones C-R para mortalidad

prematura y morbilidad estimadas se proyectan a toda la población, para ello se multiplican por sus respectivas tasas bases diarias y población expuesta por el período de un año. Las tasas bases diarias reflejan el número de casos ocurridos diariamente en Concepción Metropolitana. Así, al multiplicar cada tasa base diaria por su respectivo coeficiente C-R y agregando los casos en el período de un año para todas las comunas es posible estimar los efectos sobre la salud ante la variación de 1 µg/m³ de MP₁₀.

Luego, se requiere cuantificar en términos monetarios los daños en salud, es decir, los costos monetarios asociados a los efectos valorados, que en este caso incluyen el valor de la vida estadística (VVE) por los casos de mortalidad prematura y los costos monetarios por los ingresos hospitalarios.

Para asociar valores monetarios a la morta-

Tabla 3. Casos anuales de mortalidad y morbilidad en Concepción Metropolitana desagregados por causa y edad 2004-2008

causas/ año	Mortalidad					Morbilidad				
	2004	2005	2006	2007	2008	2004	2005	2006	2007	2008
na_tot	4.104	4.953	4.823	5.444	5.154	99.558	93.637	98.234	98.393	92.214
na_15	143	140	140	157	134	19.686	18.441	18.964	17.620	16.704
na_40	1.330	1.541	1.531	1.652	1.643	61.532	57.647	60.262	60.659	56.785
na_64	2.631	3.272	3.152	3.635	3.377	18.340	17.549	19.008	20.114	18.725
i_tot	1.147	1.386	1.374	1.531	1.420	7.153	7.167	7.199	7.571	7.030
i_15	0	5	0	3	2	159	207	131	121	129
i_40	240	277	277	293	286	3.566	3.699	3.585	3.667	3.509
i_64	907	1.104	1.097	1.235	1.132	3.428	3.261	3.483	3.783	3.392
j_tot	356	379	393	550	428	12.298	11.793	11.489	12.409	9.712
j_14	4	3	2	5	2	6.235	5.526	5.535	5.547	4.474
j_40	47	41	47	83	55	3.079	3.323	2.984	3.264	2.558
j_64	305	335	344	462	371	2.984	2.944	2.970	3.598	2.680
k_tot	430	461	448	507	499	12.545	12.221	12.481	12.317	12.341
k_15	3	2	2	1	0	2.184	2.156	1.972	1.711	1.719
k_40	220	231	217	231	255	7.885	7.650	7.918	8.104	8.158
k_64	207	228	229	275	244	2.476	2.415	2.591	2.502	2.464
isq_tot	360	444	384	453	393	1.502	1.615	1.310	1.294	1.104
isq_15	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
isq_40	94	109	94	115	111	759	852	676	679	599
isq_64	266	335	290	338	282	742	763	634	615	505
bro_tot	7	4	2	5	3	1.281	856	804	1.254	671
bro_15	0	0	0	0	1	1.095	851	799	1.153	649
bro_40	0	0	0	0	1	78	5	1	44	10
bro_64	7	4	2	5	1	108	0	4	57	12
asm_tot	12	9	14	14	14	232	223	235	351	237
asm_15	0	0	0	0	0	121	109	147	229	142
asm_40	2	2	2	5	3	77	84	73	99	66
asm_64	10	7	12	9	11	34	30	15	23	29
k703_tot	101	104	80	74	87	64	28	32	14	19
k703_15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
k703_40	68	73	57	53	63	42	20	23	11	15
k703_64	33	31	23	21	24	22	8	9	3	4

Fuente: Elaboración propia en base a DEIS.

alidad prematura en la literatura se han utilizado típicamente tres enfoques: valoración contingente, salarios hedónicos y capital humano. Mientras que para estimar los costos asociados a la morbilidad, generalmente se han utilizado los costos directos

asociados con la enfermedad, gastos defensivos y valoración contingente¹¹.

En este trabajo para la valoración de la mortalidad prematura evitada se utilizan los resultados de un estudio de salarios hedónicos que a partir de

diferencias salariales generadas por mayor riesgo de mortalidad laboral estima para Chile un VVE de 4,6 millones de dólares¹⁰. En cuanto a los casos evitados de morbilidad, estos son valorizados de acuerdo al costo de hospitalización que incluye el valor de los días cama más la consulta médica para cada enfermedad (MM\$ 0,319, MM\$ 0,226 y MM\$ 0,168 para admisiones hospitalarias cardiovasculares, respiratorias y asma, respectivamente). Estos costos se calculan según el número de días de hospitalización y el valor de la prestación médica que proviene del “Estudio de costos de prestaciones de salud” realizado por el Departamento de Salud Pública de la Pontificia Universidad Católica de Chile (Pontificia Universidad Católica de Chile. Estudio de costos de prestaciones de salud. Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Salud Pública. Santiago 2012).

Finalmente, los beneficios monetarios en salud se calculan con la siguiente fórmula:

$$\Delta \text{Beneficios} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \text{Valor unitario}_{ij} * \text{Tasa base}_{ij} * \text{Población}_j * \beta_{ij} * \Delta \text{MP}_{10}$$

Donde,

Población_j: subgrupo *j* de la población.

Tasa base_{ij}: tasa base del período para el efecto tratado *i* sobre el subgrupo de la población *j*.

β_{ij}: coeficiente C-R calculado para el contaminante con respecto al efecto tratado *i* sobre el subgrupo de la población *j*.

Valor_{ij}: valorización del efecto tratado *i* sobre el subgrupo de la población *j*.

Resultados

En esta sección se presentan los coeficientes C-R estimados y que sirven para asociar los niveles de concentración de MP₁₀ con las muertes e ingresos hospitalarios ocurridos en Concepción Metropolitana.

De acuerdo a los resultados de la Tabla 4 y los criterios de selección de la sección 2.1, se decidió utilizar para la valoración de beneficios en salud el coeficiente C-R calculado con la regresión Poisson para el total de muertes no accidentales, donde el efecto es producido por el MP₁₀ con un rezago de seis días. Así como también, los coeficientes de los ingresos hospitalarios asociado a enfermedades respiratorias en menores de 15 años (*j_15*) y asma en mayores de 64 años (*asm_64*). La especificación de los modelos seleccionados se presenta en la Tabla 5.

En la Tabla 6 se presentan los beneficios marginales en salud generados por la reducción de la concentración en una unidad. Para comprender el cálculo, se ejemplifica la estimación de beneficios para la comuna de Concepción: el coeficiente C-R para mortalidad prematura (0,001284) se multiplica por los habitantes de la comuna (230.729 personas), por la tasa de efectos base anual (0,503%), por el VVE en millones de pesos (MM\$ 2.544,3) y por el cambio en las concentraciones (1 µg/m³). El valor obtenido son los beneficios monetarios por menor mortalidad en la comuna de Concepción (MM\$ 3.794,1), los cuales sumados a los beneficios por menor morbilidad

Tabla 4. Coeficientes C-R en Concepción Metropolitana

Grupo	Caso	Modelo	Contaminante	Coef. C-R	D. Est.	Valor-p	RR
na_tot	Ingreso Hosp.	GAM	MP10_1A1	0,000233	0,00008	0,0035	1,0236
na_15	Ingreso Hosp.	Poisson	MP10_1A7	0,000930	0,00034	0,0069	1,0974
na_15	Ingreso Hosp.	GAM	MP10_1A1	0,000475	0,00018	0,0079	1,0486
na_40	Ingreso Hosp.	GAM	MP10_1A1	0,000214	0,00010	0,0344	1,0216
j_tot	Ingreso Hosp.	GAM	MP10_1A2	0,000561	0,00027	0,0367	1,0577
j_15	Ingreso Hosp.	GAM	MP10_1A2	0,000900	0,00038	0,0183	1,0941
asm_64	Ingreso Hosp.	GAM	MP10_1A1	0,000938	0,00034	0,0060	1,0984
na_tot	Mortalidad	Poisson	MP10_1A6	0,001284	0,00062	0,0366	1,1370
na_tot	Mortalidad	GAM	MP10_1A6	0,001194	0,00060	0,0195	1,1269
isq_64	Mortalidad	Poisson	MP10_1A4	0,000645	0,00024	0,0065	1,0666

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Especificación de los modelos de regresión seleccionados para la valoración de beneficios en salud en Concepción Metropolitana

Gupo	Caso	Método	Tendencia	Estacionalidad	Meteorología
j_15	Ingreso Hosp.	GAM	t_2	sen1 sen2 sen3 sen4 sen6 cos1 cos4 cos6 feriado l m x j v s mar abr may jun sep nov verano	temp (3 g.l.) humedad (3 g.l.) velviento (3 g.l.)
asm_64	Ingreso Hosp.	GAM	t	sen3 s	temp (3 g.l.)
na_tot	Mortalidad	Poisson	t t_2	sen1 cos1 cos2 cos4 x feb	lluvia

Fuente: Elaboración propia.

estimados con similar procedimiento (MM\$ 0,003 por asma en mayores de 65 años y MM\$ 0,205 por enfermedades respiratorias en menores de 15 años) permiten estimar beneficios totales en la misma comuna por MM\$ 3.794,3.

Es importante mencionar, que como los coeficientes C-R provienen de cálculos estadísticos, estos tienen un intervalo de confianza, por lo que también es posible obtener un intervalo para los beneficios (límite inferior y superior). Como era de esperar las comunas que presentan mayores beneficios son Concepción y Talcahuano, esto se debe a que los beneficios en salud están directamente relacionados con la población afectada, cuyo número es mayor en estas comunas.

Discusión

En general el cálculo de los beneficios en salud es sensible a los coeficientes C-R utilizados (especialmente de mortalidad), ya que para los otros parámetros requeridos en la función de daño existe menos incertidumbre respecto a su valor (población afectada, tasas base y variación en la contaminación).

En particular, para este estudio el coeficiente C-R de mortalidad para el total de la población por exposición aguda de MP₁₀ tiene un valor de 0,0012 y 0,0013, dependiendo del modelo estadístico utilizado (GAM o Poisson), valor similar al encontrado en un estudio para la ciudad de Santiago que arrojó un 0,0012 para exposición aguda a MP_{2,5}⁵, cabe señalar que en la zona de estudio un alto porcentaje del MP₁₀ corresponde a MP_{2,5}. A diferencia de otro estudio para Santiago¹¹ que encuentra efectos significativos del MP_{2,5} sobre todas las causas con nivel de desagregación media para

Tabla 6. Beneficios marginales estimados (MMS)

Comuna	Límite inferior	Medio	Límite superior
Concepción	232,3	3794,3	7.356,6
Coronel	113,5	1853,7	3.594,1
Chiguayante	138,0	2254,1	4.370,4
Hualqui	23,7	387,0	750,3
Lota	47,0	768,1	1.489,3
Penco	55,6	908,5	1.761,4
San Pedro de la Paz	102,4	1672,7	3.243,1
Talcahuano	172,3	2814,5	5.457,0
Tomé	57,2	934,7	1.812,2
Hualpén	83,9	1370,2	2.656,6
Total	1.025,8	16.757,7	32.490,9

Fuente: Elaboración propia.

la mortalidad, en el presente estudio se encuentra un efecto sobre el total de causas no accidentales, y en causas isquémicas al corazón en mayores de 64 años, esto último concuerda parcialmente con quienes encuentran un efecto significativo de la mortalidad sobre la población de mayor edad⁶.

De acuerdo a los datos y metodología utilizada, los beneficios en salud estimados para todas las comunas del Concepción Metropolitana varían entre 1.025,8 y 32.490,9 millones de pesos anuales con un nivel de confianza de 95% por una reducción de 1 mg/m³ en las concentraciones diarias de MP₁₀, los cuales por los datos y metodología empleada corresponden a beneficios atribuibles a exposiciones de corto plazo.

Si se comparan los beneficios calculados en este estudio respecto a los que se podrían estimar

con funciones C-R reportados por la evidencia internacional de los efectos de largo plazo de las concentraciones de MP₁₀ sobre la mortalidad en toda la población¹², ajustando por la relación MP₁₀ a MP_{2,5} en la zona de estudio, sería posible determinar beneficios anuales entre 19.520,5 y 142.281,1 millones de pesos en la zona del Concepción Metropolitano. La diferencia se debe principalmente a que los beneficios están influenciados casi en su totalidad por el efecto de la contaminación sobre la mortalidad y el coeficiente C-R para exposición a largo plazo es aproximadamente cinco veces mayor.

Referencias

1. Dockery DW, Pope CA, Xu X, Spengler JD, Ware JH, Fay ME, et al. An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities. *N Engl J Med* 1993; 329: 1753-9.
2. Pope CA, Dockery DW. Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *J Air Waste Manag Assoc* 2006; 56: 709-42.
3. Pope CA, Ezzati M, Dockery DW. Fine-Particulate Air Pollution and Life Expectancy in the United States. *N Engl J Med* 2009; 360: 376-86.
4. Polichetti G, Cocco S, Spinali A, Trimarco V, Nunziata A. Effects of particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁) on the cardiovascular system. *Toxicology* 2009; 261: 1-8.
5. Cifuentes LA, Vega J, Köpfer K, Lave LB. Effect of the Fine Fraction of Particulate Matter versus the Coarse Mass and Other Pollutants on Daily Mortality in Santiago, Chile. *J Air Waste Manag Assoc* 2000; 50 (8): 1287-98.
6. Cakmak S, Dales RE, Vidal CB. Air Pollution and Mortality in Chile: Susceptibility among the Elderly. *Environ Health Perspect* 2007; 115 (4): 524-7.
7. Sanhueza P, Vargas C, Mellado P. Impacto de la contaminación del aire por PM₁₀ sobre la mortalidad diaria en Temuco. *Rev Med Chile* 2006; 134: 754-61.
8. Sánchez J, Valdés S, Ostro B. Estimación de los beneficios en salud del Plan de descontaminación de Santiago. *Trim Econ* 1998; LXV (3): 363-406.
9. Freeman III M. The measurement of environmental and resource values, theory and methods. Washington, D.C.: Resources for the Future; 2003.
10. Parada-Contzen M, Riquelme-Won A, Vásquez-Lavin, F. The value of a statistical life in Chile. *Empir Econ* 2012; 1-15.
11. Valdés A, Zanobetti A, Halonen J, Cifuentes L, Morata D, Schwartz J. Elemental concentrations of ambient particles and cause specific mortality in Santiago, Chile: a time series study. *Environ Health* 2012; 11: 82.
12. Pope CA, Burnett RT, Thun MJ, Calle EE, Krewski D, Thurston GD. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA* 2002; 287: 1132-41.
13. Beverland I, Carder M, Cohen G, Heal M, Agius R. Associations between short/medium-term variations in black smoke air pollution and mortality in the Glasgow conurbation, UK. *Environ Int* 2013; 62: 126-32.
14. Chen R, Kan H, Chen B, Huang W, Bai Z, Song G. Association of Particulate Air Pollution With Daily Mortality-The China Air Pollution and Health Effects Study. *Am J Epidemiol* 2011; 175 (11): 1173-81.
15. Revich B, Shaposhnikov D. The effects of particulate and ozone pollution on mortality in Moscow, Russia. *Air Qual Atmos Health* 2009; 3: 117-23.
16. Samoli E, Peng R, Ramsay T, Pipikou M, Touloumi G, Dominici F. Acute Effects of Ambient Particulate Matter on Mortality in Europe and North America: Results from the APHENA Study. *Environ Health Perspect* 2008; 116: 1480-6.
17. Pope CA, Burnett RT, Thurston GD, Thun MJ, Calle EE, Krewski D, et al. Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution: Epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease. *Circulation* 2004; 109: 71-7.