Asistencia técnica para el diseño de tasas por contaminación atmosférica y cobros por emisiones de gases efecto invernadero a nivel subnacional

Informe Tarea 2

ESTIMACIÓN DE COSTOS ECONÓMICOS DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN EL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ (ESCENARIO BUSINESS-AS- USUAL)

30 de abril de 2018

The World Bank – Econometría S.A.

Technical Assistance for the Design of Air Pollution Charges and GHG Emission Levies at the Sub-National Level

Contrato 7183732

Supervisión del Contrato

Ernesto Sánchez Triana – Banco Mundial
Pablo Benítez – Banco Mundial

Econometría Consultores

Guillermo Rudas – Director Consultoría

Equipo de Econometría Consultores

Beatriz Elena Arenas
Óscar Rodríguez
Ángela Solanilla Uricoechea
Tito Ávila
Santiago Hernández
María José Libreros

Equipo de Área Metropolitana del Valle de Aburrá – AMVA

Ana Zuleima Orrego
Zoraida Piedrahíta

ESTIMACIÓN DE COSTOS ECONÓMICOS DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN EL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ (ESCENARIO *BUSINESS AS USUAL*)

TABLA DE CONTENIDO

ACRÓNIMOS iv

Resumen ejecutivo 1

Introducción 3

CAPÍTULO 1 6

Línea Base de Calidad del Aire 6

1.1 Contexto de las emisiones en el Valle de Aburrá. 6

1.2 Bases de datos y fuentes de información 9

1.3 Comparación y síntesis de las medidas del PIGECA 11

CAPÍTULO 2 13

Relación entre calidad del aire y mortalidad 13

2.1 Mortalidad en el AMVA por causas asociadas a la calidad del aire 14

2.2 Estimación de promedios mensuales municipales de $PM_{2.5}$ 18

2.3 Estimación de muertes prematuras por incrementos de $PM_{2.5}$ 21

2.4 Validación de la relación dosis-respuesta estimada 24

2.5 Crecimiento de $PM_{2.5}$ y muertes prematuras en escenario BAU 26

CAPÍTULO 3 33

Costo económico de muertes prematuras por contaminación del aire 33

3.1 Estimación del costo por muertes prematuras. Método de valor agregado perdido 34

3.1.1 Cálculo de años perdidos por rangos de edad 34

3.1.2 Cálculo del costo estadístico por muertes prematuras. 35

3.1.3 Principales supuestos y parámetros. 35

3.2 Costos de la Contaminación según valor agregado perdido - Escenario BAU 2015-2030 37

3.3 Estimación del costo por muertes prematuras. Método del valor estadístico de la vida 38

CAPÍTULO 4 42

Principales conclusiones y recomendaciones 42

Bibliografía citada 46

Anexo I. Defunciones por Enfermedades Asociadas a Calidad del Aire en el AMVA. 49

Anexo II. Estaciones de Monitoreo y Concentración de PM2.5 en Municipios del AMVA 50

Anexo III. Estimación del Impacto de PM2.5 sobre la Mortalidad en el AMVA 51

Anexo IV. Valor económico del costo de la contaminación del aire en el AMVA. 52

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1 - Lista y agrupación de enfermedades seleccionadas para este estudio 15

Cuadro 2.2 - AMVA. Número de defunciones según causa (Ene 2008 a dic 2015) 16

Cuadro 2.3 - AMVA. Registros de muertes asociadas a la calidad del aire (2008-2015) 17

Cuadro 2.4 - Tasa de mortalidad por enfermedades asociadas a la calidad del aire, según rango de edades. Miles de defunciones por mil habitantes (Promedio 2008-2015) 18

Cuadro 2.5 - AMVA. Factores Dosis-Respuesta: Incremento de mortalidad por 1 μG/M^3 adicional de $PM_{2.5}$ según tipo de causa (Incluyendo nivel educativo en el Modelo) 24

Cuadro 2.6 - AMVA. Factores Dosis-Respuesta: Incremento de mortalidad por 1 μG/M^3 adicional de $PM_{2.5}$ según tipo de causa (Excluyendo nivel educativo en el Modelo) 24

Cuadro 2.7 - Dosis–Respuesta de $PM_{2.5}$ vs Mortalidad Prematura. Otros estudios ... 25

Cuadro 2.8 - Muertes esperadas por $PM_{2.5}$ – Escenario BAU del PIGECA, Año 203030

Cuadro 2.9 - AMVA. Muertes prematuras por material particulado según causa, en escenario BAU 2015-2030 (estimación más probable) 31

Cuadro 2.10 - AMVA. Muertes prematuras por material particulado según edad, en escenario BAU 2015-2030 (estimación más probable) 32

Cuadro 3.1 - AMVA. Costo de la contaminación del aire - Escenario BAU (Aproximación moderada) 38

Cuadro 3.2 - AMVA. Costo de la contaminación del aire - Escenario BAU (Aproximación severa) 38

Cuadro 3.3 - Estimación de la relación entre Pérdida del PIB por muerte prematura y el Valor Estadístico de la Vida 41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - AMVA. Emisiones de contaminantes criterio y GEI - Escenario BAU del PIGECA (2015-2030) 8

Figura 1.2 - AMVA. Estaciones de Monitoreo de Calidad del Aire. Registros usados en este estudio 10

Figura 1.3 - AMVA. Escenario BAU de $PM_{2.5}$ y Metas del PIGECA (2015-2030) 12

Figura 2.1 - AMVA. Muertes por causas asociadas a la calidad del aire (2008-2015) 17

Figura 2.2 - AMVA. $PM_{2.5}$ – Promedio mensual municipal (Abr, 2008 - dic, 2016) 20

Figura 2.3 - Relación Dosis–Respuesta: $PM_{2.5}$ vs Mortalidad. Varios estudios..... 26

Figura 2.4 - AMVA. Muertes por causas asociadas a la calidad del aire, antes de estimar el efecto del material particulado (2015-2030) 27

Figura 2.5 - AMVA. Concentración de $PM_{2.5}$ en el escenario BAU del PIGECA..... 28

Figura 2.6 - AMVA. Muertes prematuras por $PM_{2.5}$ - Escenario BAU del PIGECA - Total y por millón de habitantes 31

Figura 3.1 - Antioquia. Comportamiento del PIB departamental..... 36

ACRÓNIMOS

AMVA	Área Metropolitana del Valle de Aburrá
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DNP	Departamento Nacional de Planeación
FG	Factor de Gradualidad
FR	Factor Regional
GEI	Gases Efecto Invernadero
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia
PIGECA	Plan Integral de Gestión de Calidad del Aire

RESUMEN EJECUTIVO

El objeto de esta parte de la asistencia técnica es estimar el costo de las muertes prematuras causadas por la contaminación del aire en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), el segundo centro urbano de Colombia con 3,9 millones de habitantes y Medellín como ciudad núcleo. Entre 2008 y 2016 los registros mensuales de $PM_{2.5}$ oscilaron entre 18 y 43 μg/m^3, para un promedio mensual de 24 μg/m^3. La tasa promedio de mortalidad fue de 4,23 casos/mil habitantes, de los cuales 0,89 casos/mil habitantes son objeto de este estudio (27% por cáncer respiratorio, 3% por causas cardiopulmonares, 40% por enfermedades crónicas de vías respiratorias inferiores y 30% por otras causas respiratorias).

De las 25 estaciones de monitoreo de calidad del aire usadas para este estudio, 16 reportan PM_{10} y 14 reportan $PM_{2.5}$, con series no siempre continuas y sin cobertura para todos los municipios del AMVA. De ellas, cuatro presentan registros simultáneos para estos dos tamaños de partículas, pudiéndose establecer una relación de 51% del segundo sobre el primero. Para efectos de este análisis, se usó este factor para hacer la respectiva conversión de valores de PM_{10} a $PM_{2.5}$. Para mortalidad, las Estadísticas Vitales del DANE registran 144.226 muertes entre 2008 y 2015 en el AMVA, con identificación de fecha y causa de defunción, tipo de seguridad social, nivel educativo, ocupación, edad, sexo, municipio y área de residencia (urbana o rural). De estos registros, para este análisis se excluyeron 21.852 casos por corresponder a muertes accidentales o violentas. Así, el 21% de los 122.374 casos analizados corresponden a las causas objeto de estudio y el 79% restante a otras causas.

Método de análisis. La dosis-respuesta entre la calidad del aire y las defunciones se estimó con un modelo Cox de supervivencia que arroja la relación entre la probabilidad de morir por una causa objeto de estudio y la probabilidad de morir por otra causa. Como variable explicativa se usó el promedio de $PM_{2.5}$ en el municipio de residencia de la persona en los 12 meses anteriores a su muerte. Se incluyeron además otras variables explicativas que reflejan las demás características de cada individuo. El período de análisis se fijó desde abril de 2009 hasta diciembre de 2015, con el fin de incluir únicamente personas para las que se cuenta con información sobre concentración promedio de $PM_{2.5}$ durante los 12 meses anteriores a la muerte. Como período de exposición se usó la edad del fallecido, un supuesto bastante fuerte pero necesario ante la ausencia de información sobre la trayectoria de residencia de la persona.

Resultados. Se encontró que las muertes prematuras se incrementarían por cada μg adicional de $PM_{2.5}$, así: 3,1% por cáncer respiratorio; 4,0% por enfermedades cardiopulmonares;

3,5% por enfermedades crónicas respiratorias; y 2,6% por el resto de enfermedades respiratorias. Según las proyecciones 2015-2030 del escenario *business-as- usual* del AMVA, el $PM_{2.5}$ causaría entre 2.543 y 3.710 muertes prematuras en el primer año del período considerado; y entre 6.220 y 11.594 muertes prematuras en el último año[1]. Los años perdidos por cada muerte prematura se calcularon relacionando la edad al momento de morir, con la expectativa de vida reportada por la OECD para Colombia (77,8 años). Esto arrojaría un costo anual entre 0,4% y 0,8% del PIB del AMVA, dependiendo de la moderación o severidad de los supuestos que se asuman sobre la relación entre la contaminación y la salud de las personas.

[1] Rangos asociados a distintos escenarios de moderación o severidad de la relación dosis-respuesta y de asumir o no un nivel máximo de contaminación antes de iniciarse la afectación sobre la salud (según el límite de la OMS).

INTRODUCCIÓN

Este proyecto lo desarrolla Econometría Consultores a solicitud del Banco Mundial para prestar asistencia técnica al Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) en desarrollo de las líneas de acción del Plan Integral de Gestión de Calidad del Aire (PIGECA). Se lleva a cabo en el marco de las tasas por contaminación al aire y los mercados de cupos de emisión de gases efecto invernadero (GEI) que viene proponiendo el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia (MADS). Como lo plantea el PIGECA, busca contribuir a la implementación de instrumentos económicos que reduzcan la exposición de la población del Valle de Aburrá a la contaminación del aire por factores primarios y secundarios de fuentes fijas y móviles. De esta manera, se otorga a los regulados mayor autonomía y flexibilidad para decidir cómo alcanzar los objetivos de calidad del aire, se crean incentivos para la aplicación de tecnologías costo-efectivas de reducción de contaminación, se reduce la carga de información sobre los reguladores y se generan fuentes de ingresos para las autoridades competentes[2].

En este contexto, el presente informe corresponde al reporte de la tarea dos de la consultoría, que se concentró en elaborar la valoración económica del daño causado por la contaminación del aire en el escenario de referencia. Este será la línea base para evaluar la relación beneficio costo que tendrán los distintos instrumentos económicos a proponer.

La relevancia del escenario de referencia es permitir que durante las próximas tareas se provea una evaluación confiable de los efectos que tendrían cada uno de los instrumentos económicos a proponer. La anterior, es parte esencial de la evaluación beneficio costo, que no solo se convertirá en herramienta para la toma de decisiones por parte de la autoridad, sino que aporta al cumplimiento de los pilares cuatro y cinco del PIGECA que hacen referencia a contar con un marco regulatorio actualizado y fortalecido y al desarrollo de instrumentos económicos y de persuasión en pro de la calidad del aire.

La construcción de este escenario partió de identificar los datos sobre concentración de contaminantes criterio como $PM_{2.5}$, PM_{10} y NO_2 para las diferentes estaciones de monitoreo de la calidad del aire del AMVA desde 2008 hasta 2016. Para esta etapa del trabajo, la atención se concentró en el material particulado, teniendo en cuenta que la tradición analítica más consolidada se ha focalizado en el análisis del efecto del $PM_{2.5}$ sobre la salud humana. Este proceso requirió la implementación de metodologías que permitieran hallar

[2] AMVA, *Plan Integral de Gestión de Calidad del Aire – PIGECA* (2017). Ver Eje Temático 10: Sistema de cargas y beneficios a agentes en función de su aporte positivo o negativo a la calidad del aire (Capítulo 6, p. 37, versión del 4 de julio de 2017).

la relación entre PM_{10} y $PM_{2.5}$, para completar las series a lo largo del tiempo para este último tamaño de partículas.

Con esta información se logró identificar la relación existente entre la calidad del aire y la salud, expresada en las causas de mortalidad, del conjunto de habitantes de los 10 municipios del Valle de Aburrá.

Con base en las Estadísticas Vitales de Colombia (DANE, 2017), este estudio partió de identificar las tasas de mortalidad por distintas enfermedades asociadas a problemas respiratorios y cardiopulmonares, así como por otras causas distintas a las muertes accidentales y violentas, para cada rango de edad. Igualmente, se tuvieron en cuenta otras variables tales como el riesgo según la actividad laboral, la edad de defunción, el acceso a la seguridad social, el área de residencia (urbana o rural) y el nivel de educación.

Esta etapa de la consultoría se concentró en identificar los costos que la contaminación del aire tiene para la sociedad en términos de costos en salud pública y pérdidas humanas, entendiendo que las muertes prematuras significan pérdidas económicas para la región y el país. Lo anterior se realizó para la población del Valle de Aburrá, haciendo la respectiva relación frente a las cifras nacionales y algunos estudios internacionales. Dado que esta tarea consistía en la construcción del escenario de referencia, la valoración se formuló a partir de las proyecciones realizadas por el PIGECA del AMVA para la situación *business as usual* (BAU) que representan el crecimiento que tendría la contaminación a lo largo del tiempo si no se implementaran las medidas establecidas por el PIGECA.

En los siguientes capítulos se explica en detalle la metodología aplicada para el manejo de datos y el análisis de los mismos, así como los resultados alcanzados. Se inicia con una descripción del escenario BAU entre 2015 y 2030 estimada por el PIGECA, la cual se usará como línea base en los siguientes capítulos del presente estudio. Así mismo, se presenta en esta sección el método de cálculo de series promedio de $PM_{2.5}$ desde 2008 hasta 2016, pasando del nivel de estación al nivel municipal, que se usarán para asociar la contaminación con la salud de las personas.

En la siguiente sección se analizan las cifras de defunciones en el AMVA entre 2008 y 2015, tipificando aquellas muertes causadas por enfermedades asociadas a la calidad del aire. A continuación, se presenta la estimación que se hizo de la relación dosis-respuesta entre la contaminación del aire y la mortalidad de las personas, tomando como referencia la evidencia presentada en el período 2008-2015. Luego se validan estos resultados, contrastándolos con los encontrados en estudios relevantes en otros contextos. Finalmente,

se culmina esta sección calculando la trayectoria que seguirían las muertes ocasionadas por el material particulado, en un escenario en donde no se logren reducir las tendencias de crecimiento de esta contaminación en los próximos años (escenario BAU).

Es la siguiente sección, partiendo del costo en vidas humanas que generaría la contaminación si no se aplican medidas adecuadas para reducirla, se procede a estimar valor monetario del costo que representaría para la economía del AMVA las muertes prematuras generadas por el material particulado. Este resultado se contrasta con las tendencias de crecimiento del PIB del AMVA para ilustrar, en términos relativos, el peso específico de estos costos.

En la última sección se analizan los resultados obtenidos, resaltando los principales alcances y destinos que puede darse a los mismos en el marco de la implementación de las líneas de acción definidas por el PIGECA. Además, se culmina esta sección poniendo de presente algunas de las limitaciones detectadas durante el estudio, proponiendo algunos retos a enfrentar a futuro. Todo eso, resaltando la necesidad de mantener una línea de acción de seguimiento y evaluación de las cambiantes relaciones entre la evolución actual y futura de la calidad del aire en el AMVA y sus implicaciones sobre la vida de las personas.

Como complemento a este informe, mayores detalles del proceso de manejo de datos sobre mortalidad se presentan con detalle en *Anexo I. Defunciones por Enfermedades Asociadas a Calidad del Aire en el AMVA*. Los detalles sobre manejo de información de calidad del aire municipal requeridos se presentan en *Anexo II. Estaciones de Monitoreo y Concentración de $PM_{2.5}$ en Municipios del AMVA*. Los resultados completos de las estimaciones de la relación dosis-respuesta entre contaminación y mortalidad, se detallan en *Anexo III. Estimación del Impacto de $PM_{2.5}$ sobre la Mortalidad en el AMVA*. Por último, la forma como se empleó esta información para calcular las muertes prematuras que podrían ser evitadas con las medidas correctivas adecuadas, así como los resultados detallados de esta valoración tanto en términos de vidas perdidas como del impacto sobre el PIB de la región, se presenta en *Anexo IV. Valor económico del costo de la contaminación del aire en el AMVA*.

Capítulo 1

LÍNEA BASE DE CALIDAD DEL AIRE

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá se encuentra ubicada en el centro del departamento de Antioquia y congrega alrededor de 3,9 millones de habitantes en el conjunto de los 10 municipios que la conforman: Medellín como municipio núcleo; Barbosa, Girardota, Copacabana y Bello, al norte; y Envigado, Itagüí, Sabaneta, La Estrella y Caldas, al sur.

Por ser uno de los epicentros del desarrollo industrial nacional, el Valle de Aburrá se ha visto afectado por la contaminación del aire y sus nocivos efectos sobre la salud de la población. Sumado a esto, la configuración geográfica del Valle complejiza la situación ya que la estructura montañosa dificulta la renovación del aire y favorece la concentración de los contaminantes criterios. El Plan Integral de Gestión de Calidad del Aire (PIGECA), fue diseñado para ejecutar acciones que aporten a la prevención y mitigación de las emisiones de contaminantes criterio y de gases de efecto invernadero (GEI), tanto de fuentes móviles como fijas. La formulación del PIGECA fue respaldada por los datos resultantes de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire y otros instrumentos de monitoreo, los cuales han revelado que la contaminación ha llegado a niveles críticos y tiene alta probabilidad de seguir aumentando si no se realizan intervenciones efectivas.

Esta sección presenta un contexto general sobre los componentes de los contaminantes presentes en el Valle de Aburrá, los sistemas de monitoreo y la información que se reporta. Así mismo, en este capítulo se hace precisión sobre las fuentes de la información utilizada, las variables encontradas, los análisis realizados y se presentan las primeras estadísticas descriptivas.

1.1 CONTEXTO DE LAS EMISIONES EN EL VALLE DE ABURRÁ.

En sus informes, el AMVA ha reportado que los efectos negativos sobre la salud están asociados a los factores determinantes de los patrones de exposición, así como a la ubicación y relación geográfica existente entre receptores y emisores, las actividades de los primeros, y al hecho de que los receptores pertenezcan a grupos particulares de mayor

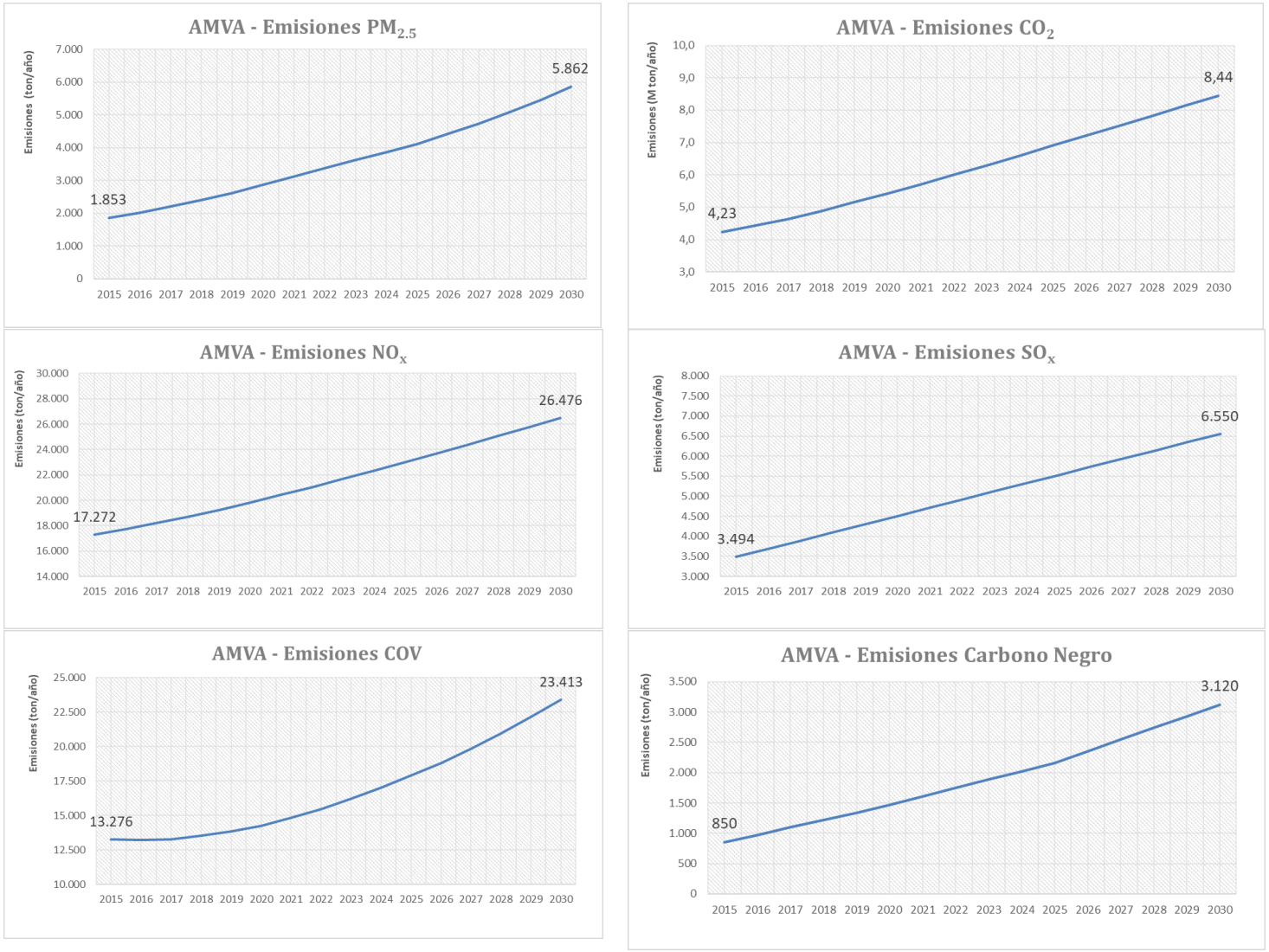
riesgo (adultos mayores, infantes, personas con enfermedades, debilidades o condiciones preexistentes). Adicionalmente, el PIGECA identifica algunos factores que afectan el acelerado crecimiento de los niveles de contaminación, tales como el crecimiento de la población en las últimas décadas, los patrones de ocupación territorial, el acelerado crecimiento del parque vehicular en carros y motos, la pérdida en la participación modal del transporte público, el rezago tecnológico y la baja renovación de vehículos, las deficiencias logísticas frente al transporte de carga el cual cuenta con alta proporción de vehículos antiguos y la baja eficiencia energética. Además, el AMVA tiene una base industrial intensiva en el uso de combustibles fósiles, entre otros asociados a temas culturales y responsabilidad social y ambiental (AMVA, 2017).

El AMVA realizó la estimación de su escenario base de emisiones con la información proveniente del Inventario de Emisiones Atmosféricas del 2015 (AMVA - UPB, 2016). Para tal efecto, se realizaron análisis diferenciados de los factores de crecimiento de las emisiones de contaminantes asociados a fuentes móviles y fuentes fijas para el período 2015 a 2030 de los contaminantes $PM_{2.5}$, NOx, SOx, compuestos orgánicos volátiles, carbono negro y CO_2. Lo anterior significó un análisis detallado de las emisiones del sector transporte y las características del mismo para los municipios del Valle de Aburrá, lo que incluyó la caracterización del parque automotor, la identificación de las tasas de motorización con su respectivo crecimiento potencial, identificación modal de la demanda de viajes (recorridos), y análisis del mercado de vehículos motorizados junto a las tasas naturales de renovación de vehículos usados. Para el análisis de las emisiones provenientes de fuentes fijas también se realizaron estudios exhaustivos sobre las emisiones asociadas al sector industrial considerando el uso de energía sectorial, la permeabilización por parte de las tecnologías de reducción control de emisiones, y las proyecciones de crecimiento económico sectorial (AMVA, 2017).

Dichos análisis permitieron la construcción de las estimaciones de crecimiento para las emisiones de $PM_{2.5}$, CO_2, NO_x, SO_x, compuestos orgánicos volátiles y carbono negro. Estas proyecciones estimadas son consideradas el escenario *business as usual* (BAU): la proyección hasta el 2030 de la situación actual, en un escenario en que no se aplicara ninguna intervención sobre las emisiones de contaminantes criterio y gases efecto invernadero.

Para este estudio se retoman las proyecciones de este escenario BAU, reconociéndolas como punto de partida para la construcción de la línea base de otras variables de interés, como las asociadas a la salud y las defunciones. Las siguientes gráficas muestran las proyecciones para algunos de los contaminantes de interés.

Figura 1.1 - AMVA. Emisiones de contaminantes criterio y GEI - Escenario BAU del PIGECA (2015-2030)



Fuente: AMVA. Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire – PIGECA (2017)

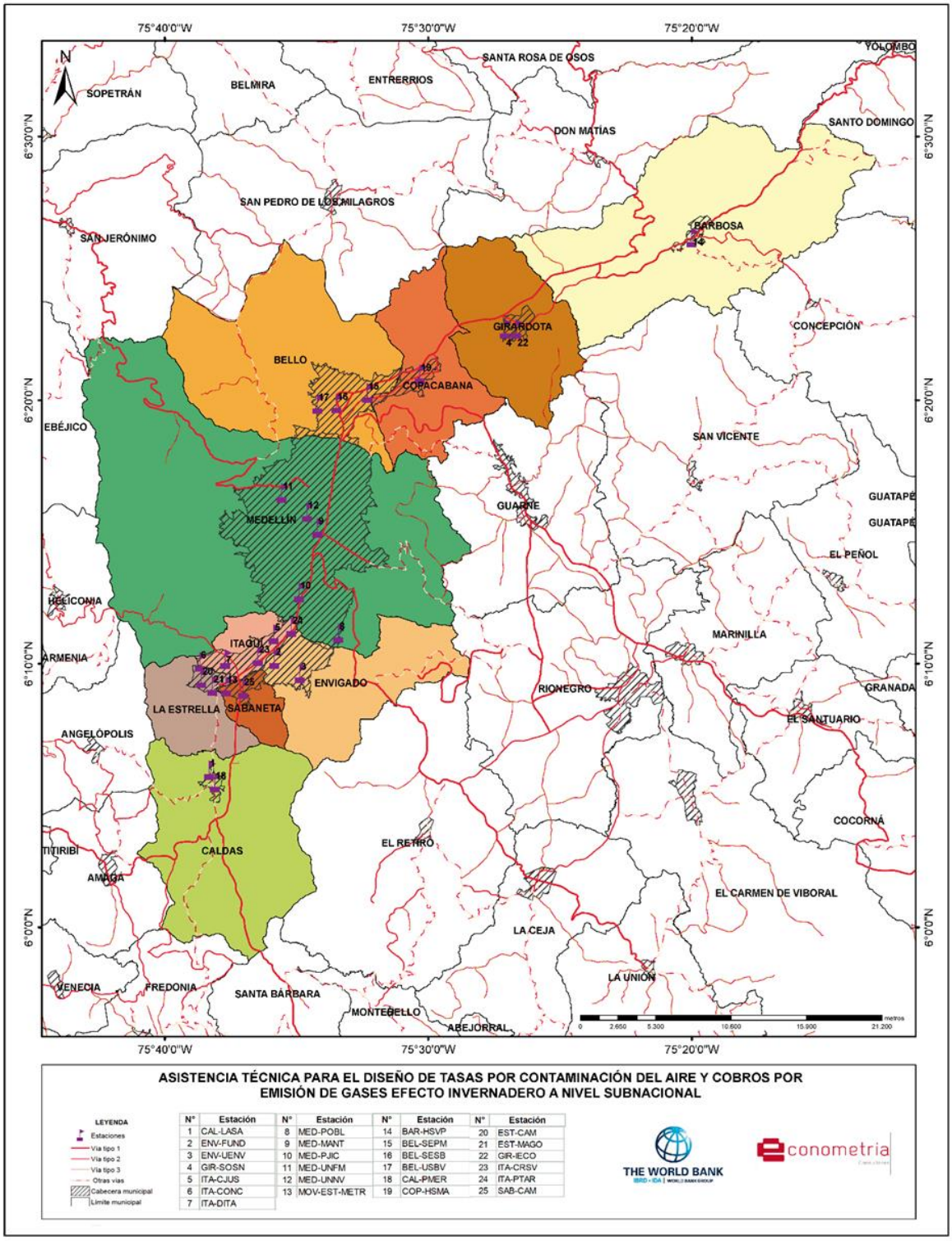
1.2 BASES DE DATOS Y FUENTES DE INFORMACIÓN

El punto de partida para el desarrollo de la presente tarea de esta consultoría fueron los datos imputados de las 25 estaciones de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire la cual hace parte del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá – SIATA y que fueron suministrados por el AMVA. Estas bases contienen información diaria sobre la cantidad de contaminantes criterio medidos en microgramos por metro cúbico ($\mu g/m^3$). Aunque no todas las estaciones reportan información para los mismos contaminantes, en general los principales contaminantes reportados por esta Red son: ozono (O_3), dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2) y material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$). Por otra parte, algunos de los municipios cuentan con más de una estación de monitoreo, pero que no necesariamente todas las estaciones miden los mismos componentes. En el siguiente mapa se evidencia la distribución de las 25 estaciones de monitoreo cuyos datos de PM_{10} y $PM_{2.5}$ fueron empleados para el presente análisis.

Como los datos no cuentan con periodicidad homogénea ni todas las estaciones hacen reporte de todos los contaminantes criterios el equipo consultor desarrolló una metodología para identificar la relación existente entre la concentración de $PM_{2.5}$ y $PM_{10,}$ que, según estudios internacionales, son los contaminantes más relevantes a la hora de medir datos sobre la salud de la población a causa de la calidad del aire (Krewski, et al., 2009) (Pope III & Dockery, 2006). Gracias a esta metodología, que se explica en detalle en el capítulo dos de este informe, se logró construir una base de datos con información diaria sobre la cantidad de $PM_{2.5}$ en $\mu g/m^3$ para los diez municipios del Valle de Aburrá, desde abril de 2008 hasta diciembre de 2016.

Por otra parte, se usaron las bases de datos de las Estadísticas Vitales del DANE (DANE, 2017) sobre defunciones entre 2008 y 20015. Estas bases poseen información sobre las muertes que se han presentado en el país, aportando información sobre el lugar de residencia de la persona fallecida, la causa de muerte, la fecha de defunción, el sexo de la persona, el rango de edad al morir, el nivel educativo, el tipo de actividad, el régimen de seguridad social y otras variables sociales que permiten caracterizar a cada uno de los individuos y algunos factores asociados a su muerte. Una restricción fuerte de esta base, para efectos del análisis aquí realizado, es que no informa sobre si la persona fumaba o no, o si alguien de su familia lo hacía. Esta es una limitación fuerte, ya que esta variable tiene gran relevancia a la hora de identificar muertes asociadas a la calidad del aire.

Figura 1.2 - AMVA. Estaciones de Monitoreo de Calidad del Aire. Registros usados en este estudio



Fuente: Econometría Consultores

Las bases de proyección poblacional del DANE (DANE, 2017) fueron fundamentales para poner en contexto las muertes, identificándolas en su relación con la población por rango de edades. Con estas bases de datos fue posible identificar las muertes asociadas a la calidad del aire en el Valle de Aburrá.

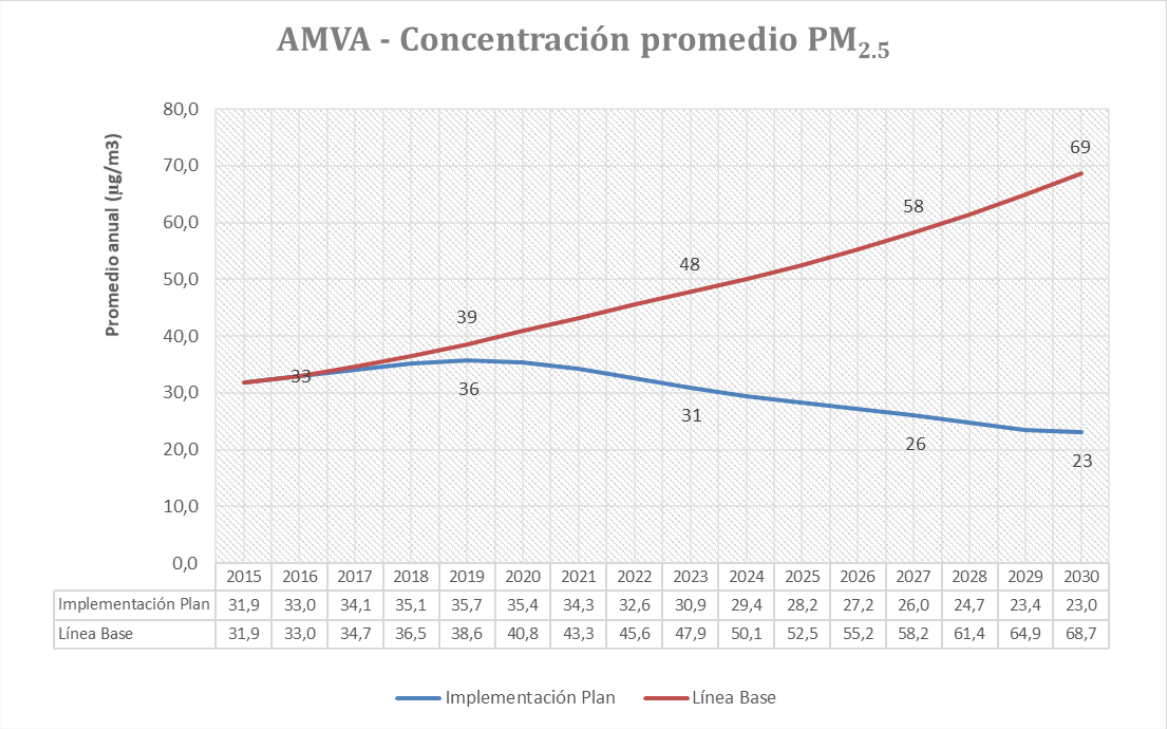
1.3 Comparación y síntesis de las medidas del PIGECA

Como se detalla en la sección anterior, la Autoridad del AMVA desarrolla actualmente el Programa Integral de Gestión de la Calidad del Aire (PIGECA) con el objetivo de reducir la exposición de la población a los contaminantes del aire, particularmente reduciendo las emisiones de $PM_{2.5}$ y otros contaminantes que contribuyen a la formación de $PM_{2.5}$ en la atmósfera. El AMVA contempla el diseño y uso de instrumentos económicos como un elemento clave del PIGECA, incluyendo también regulaciones de comando y control, instrumentos de ordenación y promoción de vehículos públicos y no motorizados, entre otras intervenciones.

Como se explicó anteriormente, los cálculos realizadas por el AMVA han permitido la estimación del escenario BAU para las emisiones. Adicionalmente, el PIGECA estimó el potencial de reducción de emisiones teniendo en cuenta el potencial de cambio en la actividad económica sectorial y la efectividad potencial de las medidas planteadas para generar reducciones sobre las emisiones de fuentes móviles. Con esto se estimó la senda de una meta para la reducción de emisiones de $PM_{2.5}$ y la consecuente reducción del nivel de concentración de este material particulado en la atmosfera.

La siguiente figura muestra cómo, mediante la implementación del PIGECA, se busca alcanzar metas de reducción de $PM_{2.5}$ entre 2025 y 2030, lo cual representa un reto con una dificultad creciente, ya que no solo incorpora metas de reducción de las tasas de crecimiento de las emisiones de contaminantes criterio y GEI, sino que adicionalmente internaliza las metas de crecimiento regional en términos de incrementar las tasas de productividad y crecimiento económico departamental. (AMVA, 2017).

Figura 1.3 - AMVA. Escenario BAU de $PM_{2.5}$ y Metas del PIGECA (2015-2030)



	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Implementación Plan	31,9	33,0	34,1	35,1	35,7	35,4	34,3	32,6	30,9	29,4	28,2	27,2	26,0	24,7	23,4	23,0
Línea Base	31,9	33,0	34,7	36,5	38,6	40,8	43,3	45,6	47,9	50,1	52,5	55,2	58,2	61,4	64,9	68,7

Fuente: Plan Integral de Gestión de Calidad del Aire (Borrador final, Cap. 7) Julio de 2017

Capítulo 2

RELACIÓN ENTRE CALIDAD DEL AIRE Y MORTALIDAD

El AMVA viene trabajando en la identificación de los efectos de la contaminación del aire sobre la salud de las personas. En particular, ha evaluado el nivel de mortalidad atribuible a la contaminación del aire en el Valle de Aburrá, así como los efectos sobre la salud de las personas y la valoración económica de tales efectos[3]. Estas evaluaciones, combinadas con estimaciones de los niveles de reducción de emisiones derivadas de las metas del Plan Integral de Gestión de Calidad del Aire (PIGECA), permitieron la valoración agregada de los beneficios de dicho Plan en términos de la disminución de mortalidad por efectos de la contaminación del aire en personas mayores de 30 años y niños menores de un año.

Para la medición de estos impactos se han utilizado modelos con alta trayectoria internacional como el BENMAP (*Environmental Benefits Mapping and Analysis Program*) desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA). Este modelo se aplicó para el año 2011 en una alianza entre el *Clean Air Institute* y el AMVA y sus resultados fueron publicados en el 2013 en un documento titulado *Estrategias Ambientales Integradas - Proyecto Desarrollo de una Estrategia Ambiental Integrada para una Movilidad Sustentable en el Área Metropolitana del Valle de Aburra Fase 1*. Este trabajo fue actualizado, tal como se reporta en el capítulo 4 del PIGECA sobre impactos a la salud y externalidades. Se concluyó que el cumplimiento de las metas del PIGECA arrojaría una disminución significativa de la mortalidad asociadas a la calidad del aire en la población analizada.

Utilizando los datos de la red de monitoreo del AMVA y el inventario de emisiones del Valle de Aburra para los contaminantes criterio, así como los resultados de las valoraciones realizadas en el marco del diseño del PIGECA, esta consultoría complementó estos análisis estimando los costos actuales de la contaminación del aire en relación con las afectaciones de la salud y el incremento de mortalidad de la población. Estos costos fueron estimados por Econometría mediante una metodología estadística asociada a las evaluaciones beneficio-costo que reconoce como beneficio las pérdidas económicas que se evitarían mediante la prevención de muertes prematuras.

[3] AMVA (2017), capítulo 4, Impactos a la Salud y Externalidades.

Lo anterior se entiende desde la teoría económica y un enfoque de capital humano o el valor de la vida estadística, ya que cada muerte evitada representa un individuo económicamente activo, con una producción per cápita que podría estar aportando al crecimiento económico. Es decir, una persona que hubiera aportado al crecimiento del PIB, pero que al morir prematuramente causaría una pérdida de este aporte. El costo de una muerte prematura está entonces asociado a la cantidad de años de productividad económica que está perdiendo la sociedad, debido a la exposición a contaminación atmosférica. Para desarrollar estas estimaciones, Econometría utilizó:

- La base de datos de la red de monitoreo de calidad de aire en las 25 estaciones de los municipios del AMVA entre abril de 2008 y 2016 (AMVA- UPB, 2017)
- La base de datos sobre defunciones nacionales, disponible en las Estadísticas Vitales de Colombia del DANE, identificando las defunciones para los 10 municipios de AMVA entre 2008 y 2015 (DANE, 2017).
- *Lista 105 de las enfermedades para Colombia para la tabulación de mortalidad* (DANE)
- La base de datos de proyecciones poblacionales del DANE para los 10 municipios del AMVA, identificando los rangos de dad de la población y las tasas de crecimiento, entre 1985 y 2020 (DANE, 2017)
- La relación existente entre las medidas de $PM_{2.5}$ y PM_{10} que permitirán completar la serie de las bases de datos para las distintas estaciones.
- Modelos econométricos de supervivencia (Modelo de Cox)
- El PIB per cápita de Antioquia.
- La tasa de crecimiento de la economía en Antioquia.
- La tasa de descuento para calcular el valor presente de las proyecciones
- La tasa de cambio (asumida para este estudio en 3.000 COP por USD)

Todos estos procesos se desarrollaron utilizando información secundaria y aplicando enfoques metodológicos similares a los presentados en algunas publicaciones del Banco Mundial sobre Colombia, Perú y Pakistán: (Sánchez, Ahmed, & Awe , 2007); (Banco Mundial, 2006); (Sánchez-Triana, Enríquez, Afzal, Nakagawa, & Khan, 2014).

2.1 MORTALIDAD EN EL AMVA POR CAUSAS ASOCIADAS A LA CALIDAD DEL AIRE

Para identificar la tasa de mortalidad por calidad del aire en el Valle de Aburrá se tomó la base de datos de defunciones del DANE y la lista 105 de las enfermedades para Colombia. En esta última se identificaron las enfermedades o causas de muerte que tienden a estar

asociadas a la calidad del aire, es decir aquellas enfermedades que afectan directamente el sistema respiratorio y sus órganos. Así mismo, se incorporaron las deficiencias cardiopulmonares, dando como resultado una lista con nueve causas que se agrupan en las siguientes cuatro categorías, manteniendo los nombres y códigos de la lista 105.

Cuadro 2.1 - Lista y agrupación de enfermedades seleccionadas para este estudio

Tumores malignos del aparato respiratorio
11 - Tumores malignos del labio, de la cavidad bucal y de la faringe
19 - Tumor maligno de la laringe
20 - Tumor maligno de la tráquea, los bronquios y el pulmón
21 - Todos los demás tumores malignos de los órganos respiratorios e intratorácicos, excepto tráquea, bronquios y pulmón
Enfermedades cardiopulmonares
52 - Enfermedad cardiopulmonar y enfermedades de la circulación pulmonar
Enfermedades crónicas de vías respiratorias inferiores
60 - Enfermedades crónicas de las vías respiratorias inferiores
Resto enfermedades respiratorias
59 - Neumonía
61 - Enfermedades del pulmón debidas a agentes externos
62 - Todas las demás enfermedades del sistema respiratorio

Fuente: Selección y agrupación de Econometría con base en Lista 105 Colombia

Se estima que en Colombia la contaminación del aire por material particulado causa alrededor de 6.000 muertes prematuras y cerca de 7.400 casos nuevos de bronquitis crónica al año (Sánchez, Ahmed, & Awe , 2007). Según literatura internacional, hay evidencia suficiente para argumentar que la contaminación en el aire tiene impactos negativos sobre la salud pública, lo que resulta en muertes prematuras y enfermedades del sistema respiratorio (Ostro, 1994). Así mismo, los estudios han demostrado que el contaminante del aire que tiene mayor relevancia al evaluar los efectos sobre la salud de la población es el material particulado de menos de 10 micrómetros de diámetro, es decir PM_{10} e inferiores (Pope III C. A., et al., 2002).

Este estudio trabajará la relación entre la tasa de mortalidad por causas asociadas a la calidad del aire y la concentración de $PM_{2.5}$ reportada por las estaciones de monitoreo.

Entre enero de 2008 y diciembre de 2015, las Estadísticas Vitales del DANE reportan para el AMVA un total de 144.226 defunciones. Al excluir 21.852 generadas por accidentes o

hechos violentos, el universo total disponible para este estudio es de 122.374 casos. El siguiente cuadro y la figura asociada a ella describen la cantidad de defunciones reportadas entre 2008 y 2015 para los 10 municipios del AMVA, clasificadas de acuerdo con las cuatro categorías de enfermedades identificadas en el Cuadro 2.1, junto con las defunciones asociadas a otras causas. Todo ello, sin contabilizar las muertes ocurridas en eventos accidentales o de violencia, por no tratarse de casos asociados a una enfermedad específica.

Cuadro 2.2 - AMVA. Número de defunciones según causa (Ene 2008 a dic 2015)

Causa de fallecimiento				
Tumores malignos del aparato respiratorio		**6.965**	**5,7%**	**27%**
11 - Tumores malignos del labio, de la cavidad bucal y de la faringe	466			
19 - Tumor maligno de la laringe	520			
20 - Tumor maligno de la tráquea, los bronquios y el pulmón	5.873			
21 - Todos los demás tumores malignos de los órganos respiratorios e intratorácicos, excepto tráquea, bronquios y pulmón	106			
Enfermedades cardiopulmonares		**765**	**0,6%**	**3%**
52 - Enfermedad cardiopulmonar y enfermedades de la circulación pulmonar	765			
Enfermedades crónicas de vías respiratorias inferiores		**10.298**	**8,4%**	**40%**
60 - Enfermedades crónicas de las vías respiratorias inferiores	10.298			
Resto enfermedades respiratorias		**7.734**	**6,3%**	**30%**
59 - Neumonía	5.572			
61 - Enfermedades del pulmón debidas a agentes externos	686			
62 - Todas las demás enfermedades del sistema respiratorio	1.476			
Total por causas asociadas con calidad del aire		***25.762***	***21%***	***100%***
Otras causas no asociadas con calidad del aire		96.612	79%	
Total defunciones (*)		***122.374***	***100%***	

(*) No incluye muertes accidentales ni violentas

Fuente: Cálculos de Econometría con base en las *Estadísticas Vitales de Colombia* reportadas del DANE

Agrupando las distintas causas dentro de los grupos propuestos para efectos de este análisis, la evolución anual de las enfermedades asociadas a la calidad del aire muestra una tendencia bastante estable en los primeros años del período, oscilando alrededor de 3.100 muertes anuales por estas causas entre 2008 y 2012. Sin embargo, partir de 2013 es notable una tendencia creciente, para llegar a más de 3.700 defunciones por esta causa en 2015 (ver el siguiente cuadro y el gráfico correspondiente).

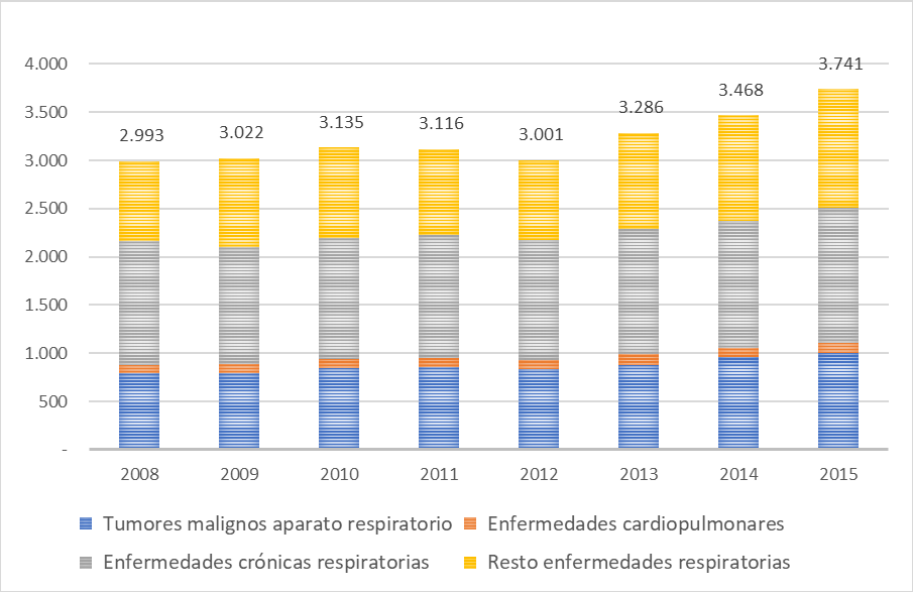
Cuadro 2.3 - AMVA. Registros de muertes asociadas a la calidad del aire (2008-2015)

Causa	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	% 2008-2015
Tumores malignos aparato respiratorio	789	788	843	860	839	881	962	1.003	27%
Enfermedades cardiopulmonares	84	101	99	93	91	106	92	99	3%
Enfermedades crónicas respiratorias	1.292	1.214	1.254	1.275	1.239	1.301	1.313	1.410	40%
Resto enfermedades respiratorias	828	919	939	888	832	998	1.101	1.229	30%
Total respiratorias	***2.993***	***3.022***	***3.135***	***3.116***	***3.001***	***3.286***	***3.468***	***3.741***	***100%***
Otras causas	11.974	11.425	11.967	11.615	12.052	11.969	12.472	13.138	
Total (*)	14.967	14.447	15.102	14.731	15.053	15.255	15.940	16.879	
Población AMVA (Miles de hab)	3.450	3.497	3.545	3.592	3.639	3.685	3.731	3.777	

(*) No incluye muertes accidentales ni violentas

Fuente: Cálculos de Econometría con base en Dane, *Estadísticas Vitales* y Dane, *Proyecciones de población*

Figura 2.1 - AMVA. Muertes por causas asociadas a la calidad del aire (2008-2015)



Fuente: Cálculos Econometría con base en Estadísticas Vitales de Colombia del DANE

Haciendo uso de estas bases estadísticas y de las correspondientes a población, se calcularon las defunciones para los distintos rangos de edades de la población. Estos rangos de edad se encuentran organizados por quinquenios, de tal forma que la población infantil y no económicamente activa se agregó en un rango de 0 a los 14 años; y los adultos mayores se encuentra en la categoría de 65 o más años, último segmento de edades reportado por el

DANE. Los detalles de la metodología aplicada para estos cálculos se presentan en el *Anexo I. Defunciones por Enfermedades Asociadas a Calidad del Aire en el AMVA*.

Cuadro 2.4 - Tasa de mortalidad por enfermedades asociadas a la calidad del aire, según rango de edades. Miles de defunciones por mil habitantes (Promedio 2008-2015)

Causa	De 0 a 14 años	De 15 a 19 años	De 20 a 24 años	De 25 a 29 años	De 30 a 34 años	De 35 a 39 años	De 40 a 44 años
Tumores malignos aparato respiratorio	0,001	0,005	0,002	0,003	0,011	0,016	0,031
Enfermedades cardiopulmonares	0,001	0,005	0,004	0,001	0,003	0,007	0,010
Enfermedades crónicas respiratorias	0,002	0,003	0,004	0,006	0,008	0,010	0,006
Resto enfermedades respiratorias	0,049	0,024	0,024	0,034	0,035	0,051	0,063
Total respiratorias	***0,053***	***0,036***	***0,034***	***0,044***	***0,057***	***0,083***	***0,110***
Otras causas	0,594	0,227	0,268	0,350	0,493	0,690	0,978
Total (*)	0,646	0,263	0,301	0,394	0,550	0,773	1,088
Población AMVA. Prom anual (Miles de hab)	768	298	312	300	274	249	259

Causa	De 45 a 49 años	De 50 a 54 años	De 55 a 59 años	De 60 a 64 años	De 65 o más	Total
Tumores malignos aparato respiratorio	0,070	0,179	0,379	0,702	2,062	0,241
Enfermedades cardiopulmonares	0,015	0,020	0,026	0,040	0,227	0,026
Enfermedades crónicas respiratorias	0,038	0,101	0,222	0,518	3,776	0,356
Resto enfermedades respiratorias	0,088	0,127	0,192	0,351	2,433	0,267
Total respiratorias	***0,211***	***0,427***	***0,819***	***1,611***	***8,497***	***0,891***
Otras causas	1,514	1,154	4,101	6,254	27,181	3,341
Total (*)	1,725	1,581	4,920	7,865	35,678	4,232
Población AMVA. Prom anual (Miles de hab)	272	244	194	148	297	3615

(*) No incluye muertes accidentales ni violentas

Fuente: Cálculos de Econometría con base en Dane, *Estadísticas Vitales* y Dane, *Proyecciones de población*

El anterior cuadro pone en evidencia que la tasa de mortalidad por enfermedades asociadas a la calidad del aire se incrementa de manera sostenida a partir de los 25 años, hasta alcanzar su tope máximo a partir de los 65 años de vida.

Esta es la información básica que se utiliza para realizar los siguientes análisis de este estudio, que buscan relacionar estas tasas de mortalidad con los distintos niveles de $PM_{2.5}$ de los municipios de residencia de las personas antes de fallecer.

2.2 Estimación de promedios mensuales municipales de $PM_{2.5}$

Como se ilustró en el capítulo anterior, la base de datos de la red de monitoreo de calidad del aire del Valle de Aburrá contiene información heterogénea entre las 25 estaciones. Esto hizo necesario desarrollar una metodología que permitiera unificar la información existente

y, cuando no existían registros, crear valores para $PM_{2.5}$ a partir de su equivalencia con los valores de PM_{10} disponibles. Adicionalmente, y dada la presentación de la base de datos de defunciones a nivel municipal, se requirió disponer de promedios municipales de estos valores[4], para poder asociar la mortalidad con las concentraciones de $PM_{2.5}$.

Para realizar este proceso, se parte de identificar los registros de las estaciones que tienen de forma simultánea información de $PM_{2.5}$ y PM_{10}. Se encontraron sólo cuatro que presentan registros simultáneos de los dos tamaños de material particulado: en Medellín, las estaciones MED_MANT con 479 registros simultáneos y MED_PJIC con 148 registros simultáneos; y en Itagüí, las estaciones ITA_CONC con 1.639 registros simultáneos e ITA_DITA con 1.213 registros simultáneos.

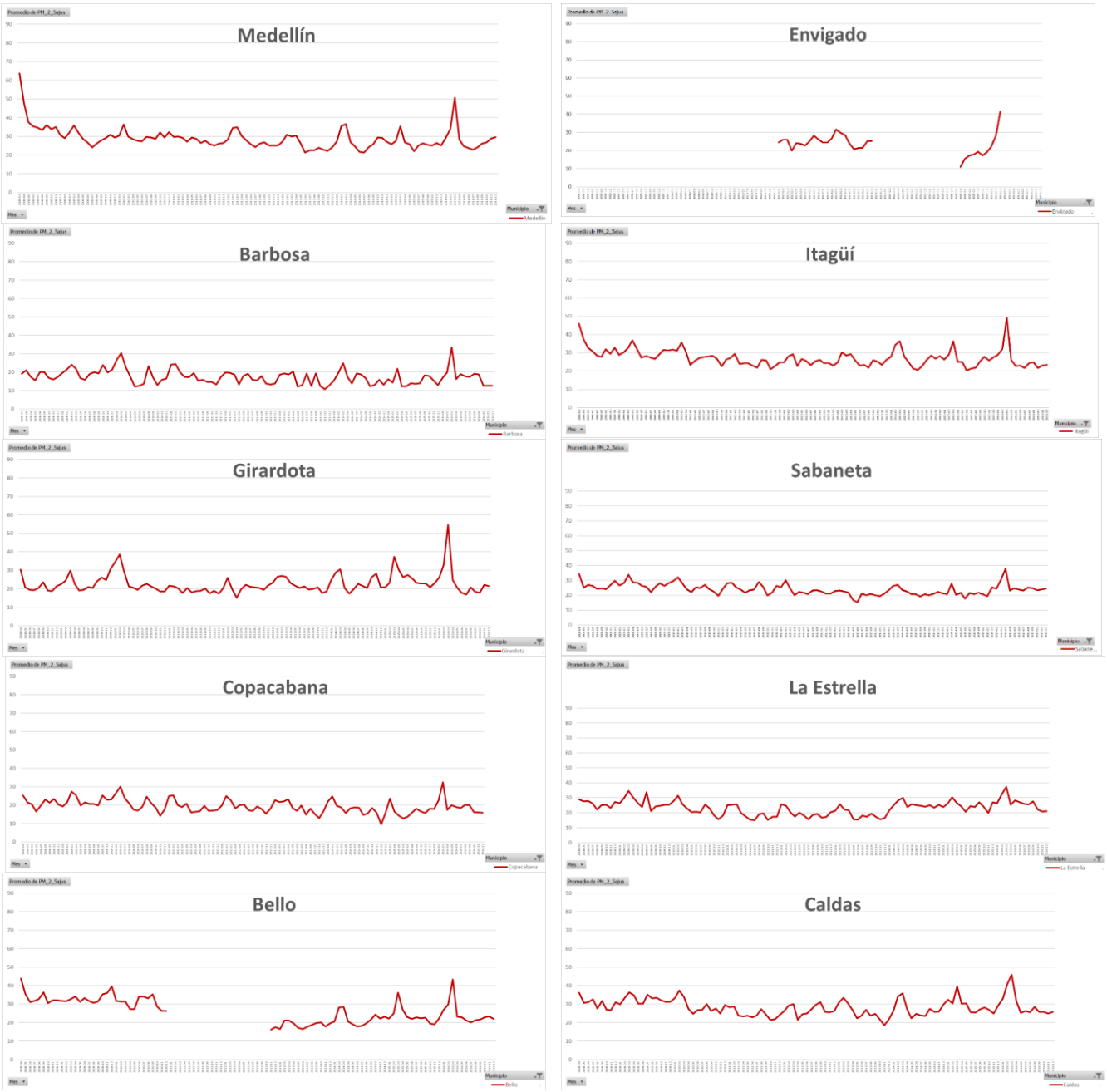
Tomando todos estos datos se encontró que, en promedio, la relación entre $PM_{2.5}$ y PM_{10} es de 0,514 con una desviación estándar de 0,105. Además, se encuentra que para las estaciones MED_PJIC, MED_MANT e ITA_DITA, los promedios de la relación entre $PM_{2.5}$ y PM_{10} tienen una diferencia estadísticamente significativa al promedio general de 0,514. En contraste, para la estación ITA_CONC esta relación no presenta una diferencia significativa con el promedio general. En conclusión, para asignar un valor de $PM_{2.5}$ a cada uno de los registros con información de PM_{10} y sin dato de $PM_{2.5}$, se aplican los siguientes porcentajes al registro conocido (PM_{10}):

- Para la estación MED_PJIC : $PM_{2.5}$ = 51,2% de PM_{10}
- Para la estación MED_ MANT : $PM_{2.5}$ = 57,0% de PM_{10}
- Para la estación ITA_DITA : $PM_{2.5}$ = 49,1% de PM_{10}
- Para el resto de estaciones : $PM_{2.5}$ = 51,4% de PM_{10} (Promedio general)

Una vez se completaron las bases del reporte diario con las halladas desde los reportes de PM_{10}, fue posible calcular los promedios mensuales de concentración de $PM_{2.5}$ para cada estación. Esto permitió hacer la posterior agrupación de las estaciones dependiendo el municipio donde están ubicadas[5], encontrando así un indicador de serie de tiempo de concentración promedio de $PM_{2.5}$ para cada municipio del Valle de Aburrá.

[4] Para mayores detalles, véase el *Anexo II. Estaciones de Monitoreo y Concentración de $PM_{2.5}$ en Municipios del AMVA.*
[5] La estación MOV_EST_METR localizada en el municipio Sabaneta no se incluye en este análisis, por ser atípica.

Figura 2.2 - AMVA. $PM_{2.5}$ – Promedio mensual municipal (Abr, 2008 - dic, 2016)



Fuente: Cálculos de Econometría con base en datos del AMVA, según metodología presentada en el Anexo II de este trabajo

2.3 ESTIMACIÓN DE MUERTES PREMATURAS POR INCREMENTOS DE $PM_{2.5}$

Para la evaluación sobre los efectos de la concentración de $PM_{2.5}$ sobre los índices de mortalidad por causas asociadas a la calidad del aire en el AMVA, se aplicaron modelos Cox de supervivencia. Estos modelos son utilizados típicamente en análisis epidemiológico, para estimar la relación entre la probabilidad de morir por una causa específica y la probabilidad de morir por una causa distinta. En este caso, se trata de estimar la relación entre la probabilidad de morir por causas asociadas a la contaminación del aire versus la probabilidad de morir por otras causas.

Los modelos de supervivencia se emplean para analizar el tiempo de ocurrencia de un evento, analizando el tiempo que transcurre desde un momento determinado hasta el momento de ocurrencia del evento. Estos modelos son utilizados ampliamente en estudios médicos, ya que permiten analizar, por ejemplo, el tiempo que transcurre desde que se detecta que una persona padece cáncer hasta el momento en que muere. Identificar las variables que se convierten en factores determinantes para explicar las variaciones en el tiempo, es una de las características más valiosas de estos modelos (Cleves, Gould, & Gutierrez, 2004).

Para aplicar estos modelos de supervivencia en este estudio, se dispuso de la siguiente información para cada persona referenciada en la base de datos de defunciones de las Estadísticas Vitales de Colombia:

- Fecha de defunción de la persona (año – mes)
- Causa del fallecimiento
- Fecha de nacimiento de la persona
- Edad de la persona
- Sexo
- Nivel de educación
- Régimen de seguridad social
- Ocupación (teniendo en cuenta el riesgo de exposición a contaminación en el aire según la labor realizada)
- Municipio de residencia
- Área de residencia (cabecera municipal y resto)

Con base en esta información, y la disponible sobre las series mensuales de concentración municipal de $PM_{2.5}$ descritas en la sección anterior, se aplicó un modelo Cox de supervivencia referido usando los siguientes criterios:[6]

Causa de la defunción. Cada persona de la base de datos se clasifica en una de cinco categorías de causa del fallecimiento: por tumor canceroso, por enfermedad cardiopulmonar, por enfermedad crónica respiratoria, por otra enfermedad respiratoria o por cualquier otra causa.

Magnitud de exposición a $PM_{2.5}$. Promedio de la concentración de $PM_{2.5}$ en el municipio de residencia de la persona fallecida, durante los 12 meses previos a la fecha de su defunción, medida en $\mu g/m^3$.

Duración del estudio. Desde marzo de 2009 hasta diciembre de 2015, con registros desde el mes 1 al 82. Aunque hay registros de $PM_{2.5}$ desde abril de 2008, el inicio del estudio se acota en marzo de 2009 para que las personas fallecidas en ese mes tengan información sobre el promedio de los últimos 12 meses[7].

Tiempo Exposición. Edad de la persona al fallecer. Ante la ausencia de información que permita identificar la movilidad de la persona, se adopta el supuesto de que residió toda su vida en el mismo municipio.

Como ya se mencionó, este modelo calcula la relación entre la probabilidad de fallecer en un mes dentro del período de estudio por alguna de las cuatro categorías de las enfermedades asociadas a la calidad del aire, frente a la probabilidad de morir por cualquier otra causa. Para tal efecto, se incluye el modelo como variable explicativa la *Magnitud de exposición a $PM_{2.5}$*. De esta forma, si el coeficiente de esta variable es significativamente mayor que uno, se concluye que la probabilidad de fallecer por un incremento en la concentración de $PM_{2.5}$ en el municipio de residencia de la persona, es mayor que la de morir por otra causa; y la magnitud de esta diferencia de probabilidades, es el valor del coeficiente por encima de la unidad (es decir, el coeficiente menos uno).

Adicionalmente, se incluyeron como variables explicativas que reflejan otros factores conocidos, distintos a la calidad del aire, que pueden incidir sobre la probabilidad de fallecer por el tipo de enfermedad del estudio: ocupación con riesgo respiratorio (si o no); afiliación a seguridad social (contributivo, subsidiado, otra forma de afiliación y no asegurado); nivel

[6] Para mayores detalles los criterios para aplica estos modelos, véase en *Anexo III. Estimación del Impacto de $PM_{2.5}$ sobre la Mortalidad en el AMVA (Dosis-Respuesta)*. Para el análisis se usó el software Stata®.
[7] Aunque hay registros de $PM_{2.5}$ hasta diciembre de 2016, el final del estudio se fija en diciembre de 2015 ya que sólo hay datos disponibles de mortalidad hasta ese mes.

educativo (ninguna o prescolar, primaria, secundaria, o superior); sexo (hombre o mujer); municipio de residencia (uno de los 10 municipios del AMVA; y área de residencia (cabecera municipal o resto).

Inicialmente se hicieron las estimaciones incluyendo todas las variables explicativas aquí descritas, con lo cual fue posible incorporar dentro del análisis un total 78.513 defunciones ocurridas entre marzo de 2009 y diciembre de 2015. Sin embargo, teniendo en cuenta un importante número de observaciones sin información sobre el nivel educativo, al excluir esta variable este número se incrementó hasta 98.660 casos estudiados[8]. Esto significa que, del total de casos susceptibles de ser incorporados al estudio, más de la quinta quedarían excluidos al incorporar la variable referida al niel educativo. Por tal motivo, para el resto del análisis se optó por usar la relación entre $PM_{2.5}$ y mortalidad estimada sin incluir la variable de nivel educativo[9].

El Cuadro 2.5 muestra el efecto más probable, así como el intervalo de confianza, que tendría un incremento de 1 $\mu g/m^3$ en la concentración de $PM_{2.5}$ en la atmósfera del AMVA, expresado en crecimiento porcentual de defunciones por cada tipo de enfermedad asociada a la calidad del aire (estimado al incluir las variables de nivel educativo en la modelación).

Como se observa, con este modelo se incorporan en el análisis 78.513 casos de defunción registrados en el período de duración del estudio. Si, por el contrario, se excluyen del grupo de variables explicativas las de nivel educativo, el número de casos estudiados se eleva a 98.660, tal como se observa en el Cuadro 2.6. Como se puede ver, para el conjunto de enfermedades asociadas a la calidad del aire el incremento porcentual de muertes ante 1 $\mu g/m^3$ adicional de $PM_{2.5}$ se mantiene prácticamente igual en los dos modelos. Sin embargo, la forma como este incremento se distribuye entre los distintos tipos de enfermedades sí se modifica.

[8] Este valor es inferior al total de 122.374 defunciones incluidas en la base de datos original. Esto obedece a dos razones: en primer lugar, porque se excluyeron 17.305 casos registrados entre abril de 2008 y febrero de 2009, para incluir únicamente casos con el promedio de 12 meses anteriores de $PM_{2.5}$; y, en segundo lugar, por la exclusión de 6.409 casos por ausencia de dato en alguna de las otras variables explicativas incluidas en el modelo.

[9] De todas formas, los resultados de los dos tipos de modelos, con y sin inclusión de las variables de nivel educativo, se presentan en el *Anexo III. Estimación del Impacto de $PM_{2.5}$ sobre la Mortalidad en el AMVA.*

Cuadro 2.5 - AMVA. Factores Dosis-Respuesta: Incremento de mortalidad por 1 µG/M³ adicional de $PM_{2.5}$ según tipo de causa (Incluyendo nivel educativo en el Modelo)

Resultados del Modelo Cox de Supervivencia				
	Más probable		Intervalo de confianza (95%)	
Causa			Mín	Máx
Tumores malignos aparato respiratorio	2,5%	(***)	1,2%	3,7%
Enfermedades cardiopulmonares	4,0%	(**)	0,0%	8,1%
Enfermedades crónicas respiratorias	4,0%	(***)	2,9%	5,1%
Resto enfermedades respiratorias	2,9%	(**)	1,7%	4,1%
Todas las enfermedades respiratorias	3,2%	(***)	2,6%	3,8%
Nivel de significancia: (***)1 %; (**)5 %; (*)10%				
Número de casos estudiados =				78.513
Fuente: Econometría con datos de DANE (Estadísticas Vitales) y AMVA (Concentración PM2.5)				

Fuente: Cálculos de Econometría con datos de DANE (Estadísticas Vitales) y AMVA (Concentración $PM_{2.5}$)

Cuadro 2.6 - AMVA. Factores Dosis-Respuesta: Incremento de mortalidad por 1 µG/M³ adicional de $PM_{2.5}$ según tipo de causa (Excluyendo nivel educativo en el Modelo)

Resultados del Modelo Cox de Supervivencia				
	Más probable		Intervalo de confianza (95%)	
Causa			Mín	Máx
Tumores malignos aparato respiratorio	3,1%	(***)	1,9%	4,2%
Enfermedades cardiopulmonares	4,0%	(**)	0,5%	7,6%
Enfermedades crónicas respiratorias	3,5%	(***)	2,5%	4,5%
Resto enfermedades respiratorias	2,6%	(**)	1,5%	3,7%
Todas las enfermedades respiratorias	3,2%	(***)	2,6%	3,7%
Nivel de significancia: (***)1 %; (**)5 %; (*)10%				
Número de casos estudiados =				98.660
Fuente: Econometría con datos de DANE (Estadísticas Vitales) y AMVA (Concentración PM2.5)				

Fuente: Cálculos de Econometría con datos de DANE (Estadísticas Vitales) y AMVA (Concentración $PM_{2.5}$)

Teniendo en cuenta que la cobertura del estudio es sustancialmente mayor cuando no se incluyen las variables de nivel educativo, el resto del estudio se realiza con este último modelo.

2.4 VALIDACIÓN DE LA RELACIÓN DOSIS-RESPUESTA ESTIMADA

Para validar los resultados de las estimaciones de la relación dosis-respuesta, en esta sección se comparan los resultados encontrados para el AMVA con resultados de otras investigaciones sobre el efecto de $PM_{2.5}$ la mortalidad prematura. Con este fin, en el

siguiente cuadro se reseñan 15 estudios internacionales realizados entre 1993 y 2006 y reseñados por (Pope III & Dockery, 2006). Se compararon los resultados de este estudio para cambios en el porcentaje de incremento en riesgo relativo de mortalidad por cáncer del sistema respiratorio[10], por enfermedades cardiopulmonares y por todas las enfermedades en su conjunto (en el caso del AMVA, únicamente las del sistema respiratorio).

Cuadro 2.7 - Dosis–Respuesta de $PM_{2.5}$ vs Mortalidad Prematura. Otros estudios

			Porcentaje de incremento en riego relativo de mortalidad (Intervalo de onfianza 95%)		
Estudio	**Fuente primaria**	**Incremento en exposición**	**Todas las causas**	**Cardiopulmonar**	**Cáncer de pulmón**
Harvard Six Cities, original	Dockery et al. 1993	10 µg/m³ $PM_{2.5}$	13 (4.2, 23)	18 (6.0, 32)	18 (-11, 57)
Harvard Six Cities, reanálisis HEI	Krewski et al. 2000	10 µg/m³ $PM_{2.5}$	14 (5.4, 23)	19 (6.5, 33)	21 (-8.4, 60)
Harvard Six Cities, análisis extendido	Laden et al. 2006	10 µg/m³ $PM_{2.5}$	16 (7, 26)	28 (13, 44)[a]	27 (-4, 69)
ACS, original	Pope et al. 1995	10 µg/m³ $PM_{2.5}$	6.6 (3.5, 9.8)	12 (6.7,17)	1.2 (-8.7, 12)
ACS, HEI reanalysis	Krewski et al. 2000	10 µg/m³ $PM_{2.5}$	7.0 (3.9, 10)	12 (7.4, 17)	0.8 (-8.7, 11)
ACS, extended analysis	Pope et al. 2002	10 µg/m³ $PM_{2.5}$	6.2 (1.6, 11)	9.3 (3.3, 16)	13.5 (4.4, 23)
ACS adjusted using various education weighting schemes	Pope et al. 2004 Dockery et al. 1993 Pope et al. 2002 Krewski et al. 2000	10 µg/m³ $PM_{2.5}$	8 - 11	12 (8 , 15) 12 - 14	3 - 24
ACS Intrametro Los Angeles	Jerrett et al. 2005	10 µg/m³ $PM_{2.5}$	17 (5, 30)	12 (-3, 30)	44 (-2, 211)
Postneonatal infant mortality, CA	Woodruff et al. 2006	10 µg/m³ $PM_{2.5}$	7.0 (-7, 24)	113 (12, 305)	
AHSMOG, males only	McDonnell et al. 2000	10 µg/m³ $PM_{2.5}$	8.5 (-2.3, 21)	23 (-3, 55)	39 (-21, 150)
AHSMOG, females only	Chen et al. 2005	10 µg/m³ $PM_{2.5}$		42 (6, 90)	
Cystic fibrosis	Gross et al. 2004	10 µg/m³ $PM_{2.5}$	32 (-9, 93)		
11 CA countries, elderly	Enstrom 2005	10 µg/m³ $PM_{2.5}$	1 (-0.6, 2.6)		
Estudio AMVA	Econometría, 2017	10 µg/m³ $PM_{2.5}$	32 (26, 37)(*)	40 (5, 76)	31 (19, 43)

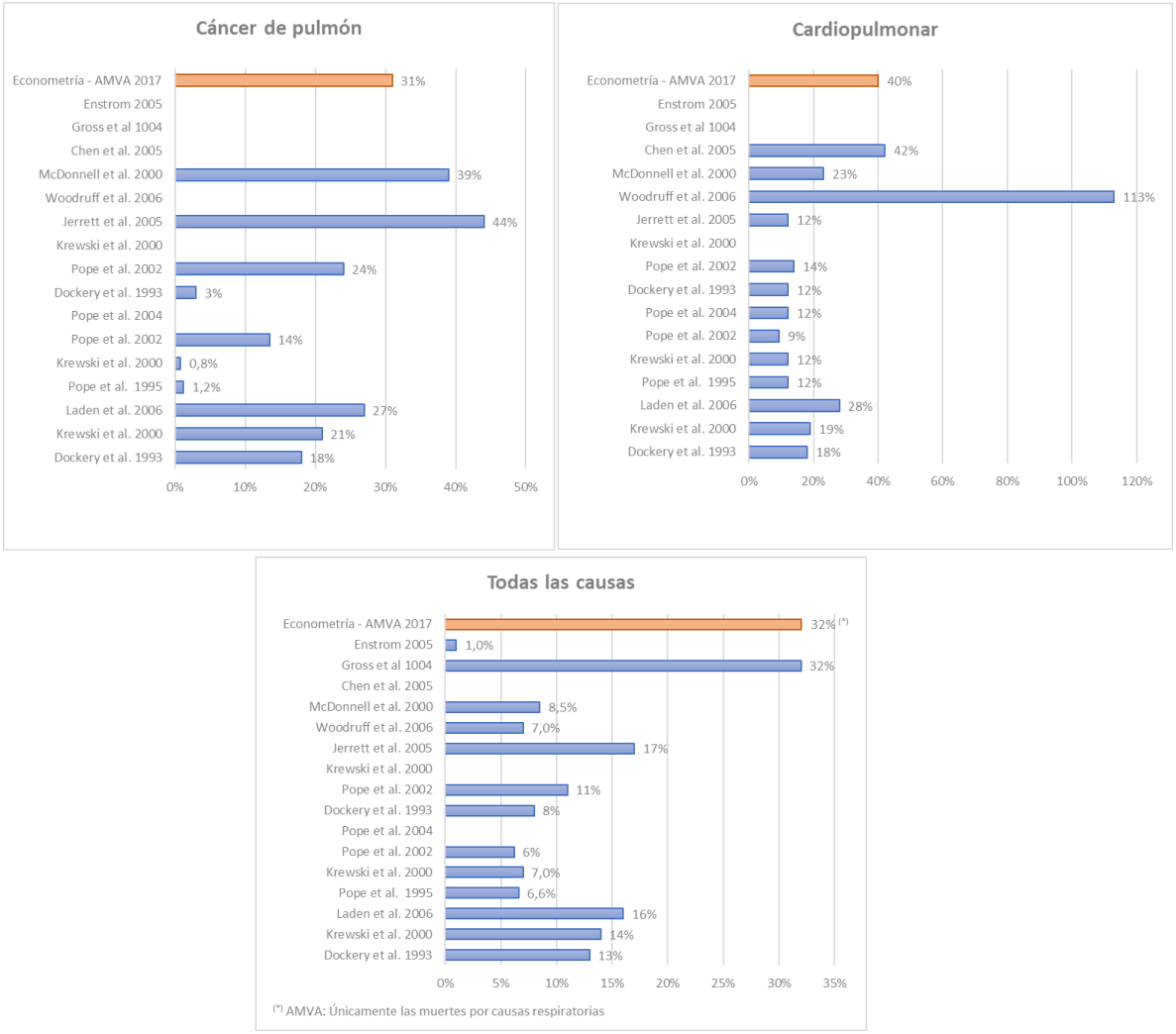
Fuente: (Pope III & Dockery, 2006) y Econometría (2017)

Como se observa en la siguiente figura, el resultado obtenido para el AMVA para muertes prematuras por cáncer del aparato respiratorio se encuentra dentro de los mismos órdenes de magnitud de la mayoría de los estudios reseñados. Igual sucede con los resultados de muertes prematuras asociadas a enfermedades cardiopulmonares, aunque mucho más cerca del límite superior del resto de resultados típicos. En donde sí se encuentra un resultado bastante distinto es en el conjunto de todas las enfermedades, en donde el resultado para el AMVA es muy similar a un resultado totalmente atípico del resto de resultados. No obstante, esto puede tener su explicación en que los demás estudios se refieren a todas las enfermedades y no sólo a las asociadas directamente con la calidad del aire, mientras que el

[10] El estudio citado denomina como lung cancer (cáncer de pulmón) a todos los tumores cancerígenos del aparato respiratorio.

presente estudio arroja este resultado exclusivamente para las enfermedades de este último tipo.

Figura 2.3 - Relación Dosis – Respuesta: $PM_{2.5}$ vs Mortalidad. Varios estudios



Fuente: (Pope III & Dockery, 2006) y Econometría (2017)

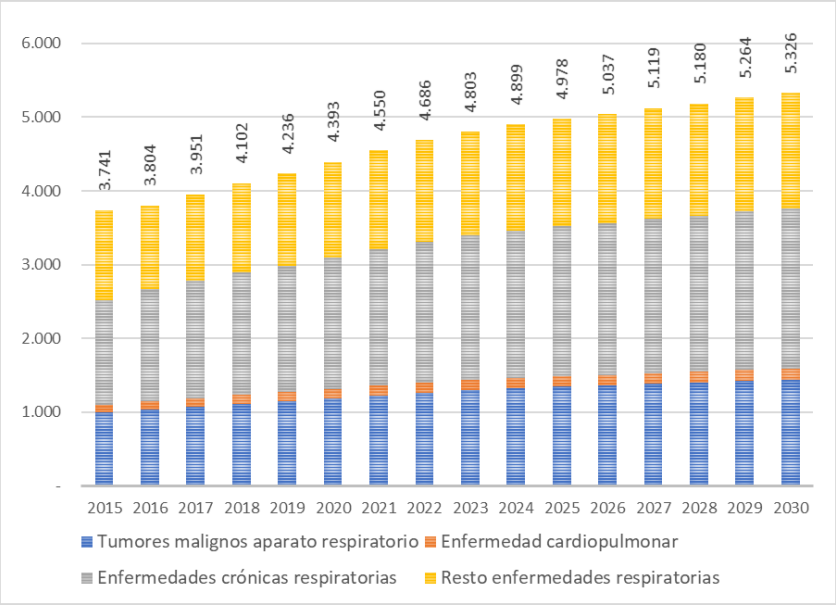
2.5 Crecimiento de $PM_{2.5}$ y muertes prematuras en escenario BAU

Tomando como referente las proyecciones de población por rangos de edad para el período 2015-2030, [11] se aplicaron las tasas de mortalidad calculadas para el período 2008-2015. De esta forma, se obtiene una proyección del número de defunciones entre 2015 y 2030, antes de tener en cuenta los incrementos de $PM_{2.5}$ que se estima sucederán a futuro. Es decir,

[11] El DANE proyecta la población total y por rangos de edades hasta 2020. A partir de ese año, las proyecciones son propias de este trabajo.

antes de aislar el efecto niveles del $PM_{2.5}$, teniendo en cuenta que no todas las defunciones reportadas hasta el 2015 por cusas asociadas a la calidad del aire, son efectivamente causadas por la concentración de este material particulado (ver figura 2-4).

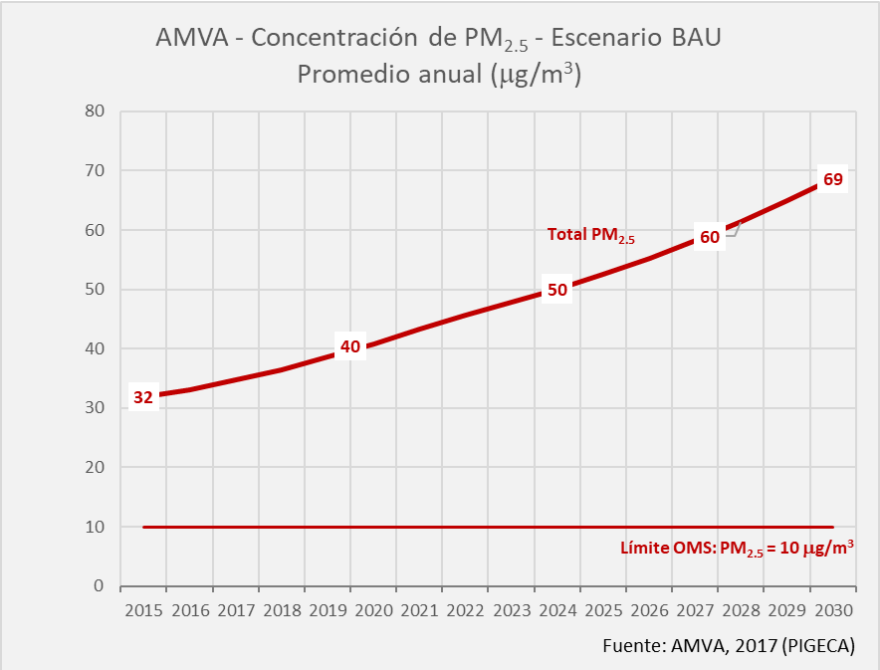
Figura 2.4 - AMVA. Muertes por causas asociadas a la calidad del aire, antes de estimar el efecto del material particulado (2015-2030)



Fuente: Cálculos de Econometría con base en DANE, *Estadísticas Vitales* y DANE, *Proyecciones de población*

En el resto de este trabajo, estas proyecciones se usarán como línea base para realizar las estimaciones asociadas a la relación dosis-respuesta entre el crecimiento de la contaminación en el escenario BAU del PIGECA (ver figura 2-5) y el número de muertes prematuras.

Figura 2.5 - AMVA. Concentración de $PM_{2.5}$ en el escenario BAU del PIGECA



Fuente: Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire – PIGECA del AMVA (Capítulo 7) y (OMS, 2006)

Una vez realizadas estas proyecciones, se procede a aplicar las relaciones dosis-respuesta del $PM_{2.5}$ sobre cada tipo específico de causa de defunción. Para tal fin, se parte del nivel de defunciones proyectado antes de considerar la incidencia de $PM_{2.5}$ (figura 2.4). Luego, al número de muertes de cada año se le aplica el producto del factor dosis-respuesta (número de muertes causadas por un $\mu g/m^3$ adicional de $PM_{2.5}$, de acuerdo con el Cuadro 25.6), multiplicado por el nivel de $PM_{2.5}$ del año base (es decir, 2015). Este proceso arroja un primer indicador: el número de muertes que causaría el $PM_{2.5}$ cada año, si el nivel de este material particulado se mantuviera constante al nivel del año 2015.

A continuación, se procede a aplicar el incremento anual de $PM_{2.5}$ en relación con su nivel en 2015, según el escenario BAU estimado por el PIGECA del AMVA para el período 2015-2030 (ver Figura 2.4). Para tal efecto, se analizan dos aproximaciones alternativas. En primer lugar, una aproximación bastante moderada, suponiendo que las afectaciones de $PM_{2.5}$ sobre la salud se producen únicamente a partir de 10 $\mu g/m^3$; y asumiendo una tendencia decreciente de la relación dosis-respuesta a partir de 40 $\mu g/m^3$ de concentración del $PM_{2.5}$ en la atmósfera (es decir, que esta relación no es lineal). En segundo lugar, una aproximación con criterios mucho más severos, asumiendo que la incidencia nociva sobre la salud se inicia desde los primeros niveles de concentración de $PM_{2.5}$; y que la relación

dosis-respuesta se mantiene constante, independientemente de los niveles que alcance el $PM_{2.5}$, es decir, con un efecto lineal más fuerte sobre la salud humana.

La primera de estas aproximaciones (la más moderada) retoma el criterio expresado por la guía de calidad del aire de la OMS, en donde se asume que, a partir del nivel de 10 μg/m³, "*se ha demostrado, con más del 95% de confianza, que la mortalidad total, cardiopulmonar y por cáncer de pulmón, aumenta en respuesta a la exposición prolongada al $PM_{2.5}$*" (OMS, 2006, pág. 10). En consecuencia, para calcular el número de muertes generadas por $PM_{2.5}$ se empieza a contabilizar su efecto sobre la mortalidad sólo a partir de los 10 μg/m³. Además, se asume que la afectación por cada μg/m³ adicional no se mantiene constante, sino que empieza a reducirse sistemáticamente cuando la concentración de $PM_{2.5}$ sobrepasa determinados niveles[12].

En relación con el supuesto de no linealidad del efecto de $PM_{2.5}$ sobre la salud humana y de la existencia de un umbral antes de iniciarse esta afectación, no hay suficiente consenso en la literatura especializada. Al revisar varios estudios, Pope III y Dockery encuentran que "*en general, las formas de la función de concentración-respuesta estimadas no fueron significativamente diferentes de las lineales y no fueron consistentes con umbrales bien definidos*". De todas formas, estos autores reconocen que "*no hay suficiente poder estadístico para hacer inferencias sólidas con respecto a la forma de estas funciones*" (Pope III & Dockery, 2006).

Ante la ausencia de unidad de criterios al respecto, la segunda aproximación aquí realizada (la que supone efectos más severos) asume a título ilustrativo la inexistencia de un umbral de no afectación (como el que asume la OMS); y la relación dosis-respuesta entre concentración y mortalidad se aplica de manera estrictamente lineal. Bajo esta aproximación, los niveles iniciales y finales de muertes prematuras frente a los incrementos de $PM_{2.5}$ señalados por el escenario BAU del AMVA, resultan bastante mayores que los estimados en la aproximación más conservadora.

Por otra parte, al estimar los factores dosis-respuesta para cada tipo de enfermedad (ver Cuadro 2.6), además de los valores más probables se obtienen los valores máximo y máximo dentro del intervalo de confianza que arroja el modelo. Teniendo en cuenta estas diversas aproximaciones, el siguiente cuadro muestra que para el año 2030 en el escenario BAU las muertes prematuras pueden variar, dentro del intervalo de confianza de las funciones dosis-respuesta estimadas, entre 3.425 y 18.979 personas fallecidas por causa del material particulado. Y, dentro de este rango, los valores más probables de ocurrencia de estas

[12] Estos análisis se hicieron para tres puntos de inicio de crecimiento no lineal y decreciente: de 60, 50, 40 μg/m³. Los resultados completos se presentan en el *Anexo IV. Valor económico del costo de la contaminación del aire en el AMVA*.

muertes prematuras oscilarían entre 6.220 y 11.594 personas por año. El límite inferior de este resultado es, en términos estadísticos, prácticamente el mismo valor que las 5.923 muertes prematuras estimadas anteriormente por el diseño del PIGECA para el mismo año 2030, bajo el escenario de no aplicación de las medidas contempladas en este Plan. De todas formas, al aplicar supuestos menos restrictivos, el límite superior de la estimación llega a duplicar el número de muertes prematuras estimado anteriormente por el Plan.

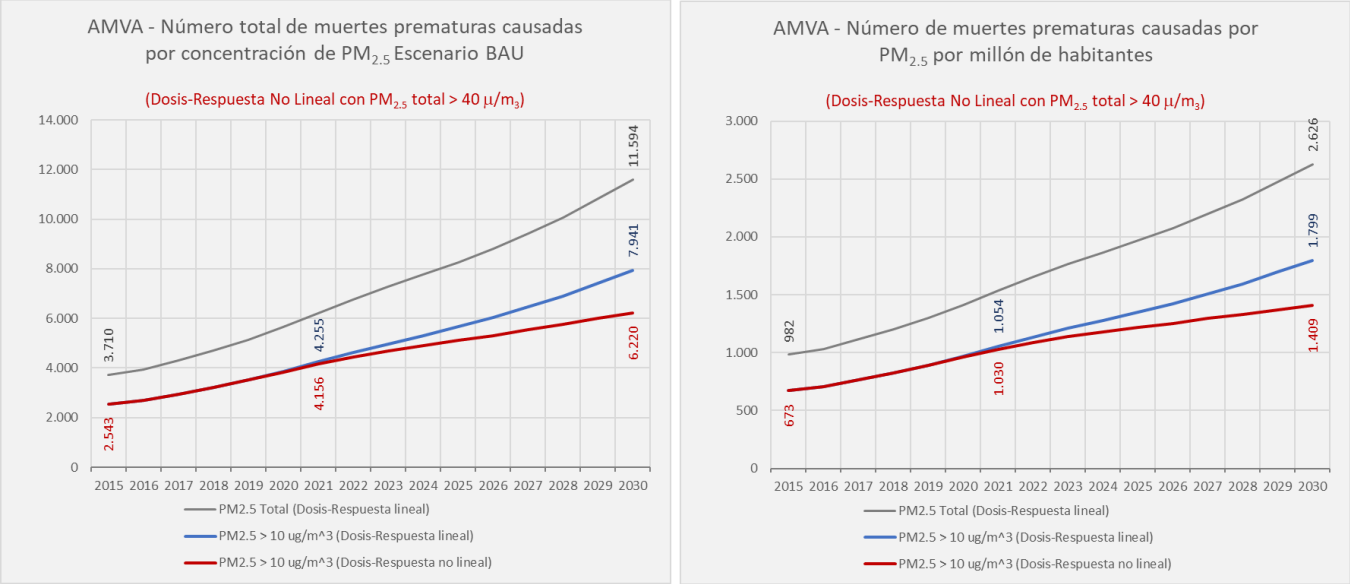
Cuadro 2.8 - Muertes esperadas por $PM_{2.5}$ – Escenario BAU del PIGECA, Año 2030

TIPO DE ESTIMACIÓN		***Según supuestos de afectación***	
Según estimación de la relación Dosis-Respuesta [porcentaje de muertes por 1 µg/m³ de $PM_{2.5}$]		***Moderada***	***Severa***
		[Efecto a partir de 10 µg/m³ de $PM_{2.5}$ y función no lineal a partir de $PM_{2.5}$ >= 40 µg/m³]	[Efecto a partir de 0 µg/m³ de $PM_{2.5}$ y función estrictamente lineal]
Intervalo de Confianza del 95%	Más probable	6.220	11.594
	Mínimo	3.425	6.111
	Máximo	9.801	18.979

Fuente: Estimaciones de Econometría aplicando el modelo Cox de supervivencia (ver Anexo III)

Para ilustrar cómo evolucionarían estos indicadores para el escenario BAU del AMVA según distintas aproximaciones de estimación, las siguientes figuras muestran los valores de muertes prematuras resultantes entre 2015 y 2030. Allí se muestran tanto los indicadores totales para el AMVA, como por cada millón de habitantes, correspondientes a los resultados más probables de estimaciones realizadas (teniendo en cuenta el crecimiento poblacional).

Figura 2.6 - AMVA. Muertes prematuras por $PM_{2.5}$ - Escenario BAU del PIGECA - Total y por millón de habitantes



Fuente: Estimaciones de Econometría usando los resultados del modelo Cox de supervivencia (ver Anexo IV)

Adicionalmente, estas proyecciones se adelantaron para cada tipo de enfermedad, aplicando los factores dosis-respuesta de cada una de ellas a las muertes proyectadas para cada rango de edad antes de contabilizar el efecto de $PM_{2.5}$. Los siguientes cuadros presentan una síntesis, por rangos de edades y por causas de fallecimiento, de los principales indicadores resultantes del análisis del material particulado como generador de muertes prematuras, las cuales se pueden prevenir aplicando las medidas contempladas en el PIGECA.

Cuadro 2.9 - AMVA. Muertes prematuras por material particulado según causa, en escenario BAU 2015-2030 (estimación más probable)

Con crecimiento de dosis-respuesta no lineal, desde $PM_{2.5}$ > 40 µg/m3			
Causa	2015	2030	Total 2015-2030
Tumores malignos aparato respiratorio	677	1.627	18.665
Enfermedades cardiopulmonares	87	253	2.801
Enfermedades crónicas respiratorias	1.075	2.928	32.819
Resto enfermedades respiratorias	705	1.412	16.636
Total Escenario BAU	***2.543***	***6.220***	***70.921***

Fuente: Estimaciones de Econometría usando los resultados del modelo Cox de supervivencia (ver Anexo IV)

Cuadro 2.10 - AMVA. Muertes prematuras por material particulado según edad, en escenario BAU 2015-2030 (estimación más probable)

Con crecimiento de dosis-respuesta no lineal, desde $PM_{2.5}$ > 40 µg/m_3						
	Mortalidad x 1000 hab de cada rango de edad (Prom 2008-2015)			Muertes prematuras (#)		
Edad	Total respiratorias	Otras causas	Por $PM_{2.5}$	2015	2030	Total 2015-2030
De 0 a 14 años	0,053	0,594	0,026	20	41	513
De 15 a 19 años	0,036	0,227	0,018	5	12	144
De 20 a 24 años	0,034	0,268	0,027	9	11	141
De 25 a 29 años	0,044	0,350	0,041	13	15	194
De 30 a 34 años	0,057	0,493	0,033	10	22	264
De 35 a 39 años	0,083	0,690	0,051	14	31	363
De 40 a 44 años	0,110	0,978	0,055	13	37	430
De 45 a 49 años	0,211	1,514	0,127	35	57	729
De 50 a 54 años	0,427	1,154	0,272	73	133	1.682
De 55 a 59 años	0,819	4,101	0,515	117	284	3.340
De 60 a 64 años	1,611	6,254	0,960	166	500	5.598
De 65 o más años	8,497	27,181	6,101	2.069	5.079	57.523
Total	***0,891***	***3,341***	***0,673***	***2.543***	***6.220***	***70.921***

Fuente: Estimaciones de Econometría usando los resultados del modelo Cox de supervivencia (ver Anexo IV)

Capítulo 3

COSTO ECONÓMICO DE MUERTES PREMATURAS POR CONTAMINACIÓN DEL AIRE

En las secciones precedentes se construyeron indicadores mensuales de mortalidad por causas asociadas a la calidad del aire para los municipios del AMVA. Adicionalmente, se procesó la información disponible sobre niveles mensuales de contaminación municipal por $PM_{2.5}$. Con base en esta información, se procedió a estimar las relaciones dosis-respuesta entre esta contaminación del aire y las muertes prematuras generadas por la misma. Finalmente, se estimó el número de muertes prematuras que se generarían en el período 2015-2030, en un escenario *business as usual* (BUA) de crecimiento de la contaminación estimado por el PIGECA del AMVA bajo el supuesto de que no se adelantaran las acciones planteadas por este Plan.

En esta sección se presenta una estimación del costo en que incurriría la economía del AMVA por estas muertes prematuras, usando dos metodologías: la pérdida de productividad del capital humano y el valor estadístico de la vida. La primera de ellas expresa el valor económico de una muerte prematura en términos de la pérdida de la oportunidad de que las personas fallecidas hubieran contribuido al desarrollo económico de la región. O, dicho de otra forma, el potencial de beneficios económicos que tienen las acciones que logren prevenir a futuro estas muertes generadas por la contaminación del aire. La segunda expresa de manera más completa el valor de la vida, en la medida en que es una expresión de la disponibilidad a pagar que tienen los individuos para disminuir el riesgo de una muerte prematura.

Fue posible adelantar la primera de esta valoración de los costos de las muertes prematuras (o de los potenciales beneficios de evitar dichas muertes), ya que se pudo estimar el incremento de la probabilidad de muertes prematuras por la exposición a contaminación por material particulado ($PM_{2.5}$) en los distintos rangos de edad. Y, asumiendo una expectativa de vida en Colombia de 77,8 años (OECD, 2017), fue posible calcular para cada rango de edades, el valor agregado que hubiesen podido aportar estas personas si no se hubiere incrementado su probabilidad de morir prematuramente.

Para el caso del valor estadístico de la vida, se usó como punto de referencia un estudio realizado en São Paulo (Brasil), en donde se indagó a la población sobre su disponibilidad a pagar por un medicamente hipotético que reduciría en cierta magnitud la probabilidad de morir prematuramente (Ortiz, Markandya, & Hunt, 2009).

3.1 Estimación del costo por muertes prematuras. Método de valor agregado perdido

Para valorar en términos monetarios los costos que genera la contaminación al causar muertes prematuras, este estudio asume que el costo estadístico de cada una de esas defunciones equivale al valor agregado que esa persona hubiese podido aportar durante el resto de su vida, si no hubiese fallecido prematuramente.

Este proceso de valoración se adelantó aplicando los siguientes pasos metodológicos:

3.1.1 Cálculo de años perdidos por rangos de edad

El cálculo de años perdidos por muerte prematura, para cada rango de edad al momento del fallecer, se realizó de la siguiente manera:

- Para el cálculo de los años perdidos por una muerte prematura de cada rango de edad (ver Cuadro 2.10) se tomó como referencia la edad media del respectivo rango y se contrastó con la expectativa de vida promedio del país (77,8 años). La diferencia entre esos dos valores se asume como años económicamente perdidos por haber fallecido la persona de manera prematura.
- Para el rango de edad de 0 a 14 años, los años perdidos se calcularon tomando como referencia los mismos años perdidos del rango entre 15 y 19 años, asumiendo que, en promedio, antes de 1os 15 años una persona no es económicamente activa.
- Por la forma de presentación de las proyecciones de población por parte del DANE, el último rango de los estimativos de muertes prematuras fue de 65 o más años (ver Cuadro 2.10). De la base de datos de muertes asociadas a la calidad del aire, se encontró que las defunciones por estas causas en ese rango de edad entre 2008 y 2015 se distribuyeron de la siguiente manera: de 65 a 69 años, 13% de los casos; de 70 a 74 años, 16% de los casos; de 75 a 79 años, 18% de los casos; y de 80 o más años, 53% de los casos. A su vez, el tiempo perdido en promedio por cada uno de estos rangos de edad son, respectivamente, 10,3 años, 5,3 años, 0,3 años y 0,0 años. De esta forma, aplicando la distribución porcentual de las muertes en cada rango al

tiempo perdido en cada uno de ellos, se obtiene un promedio ponderado de 2,2 años perdidos para el rango total de muertes con edad de 65 o más años.

3.1.2 Cálculo del costo estadístico por muertes prematuras.

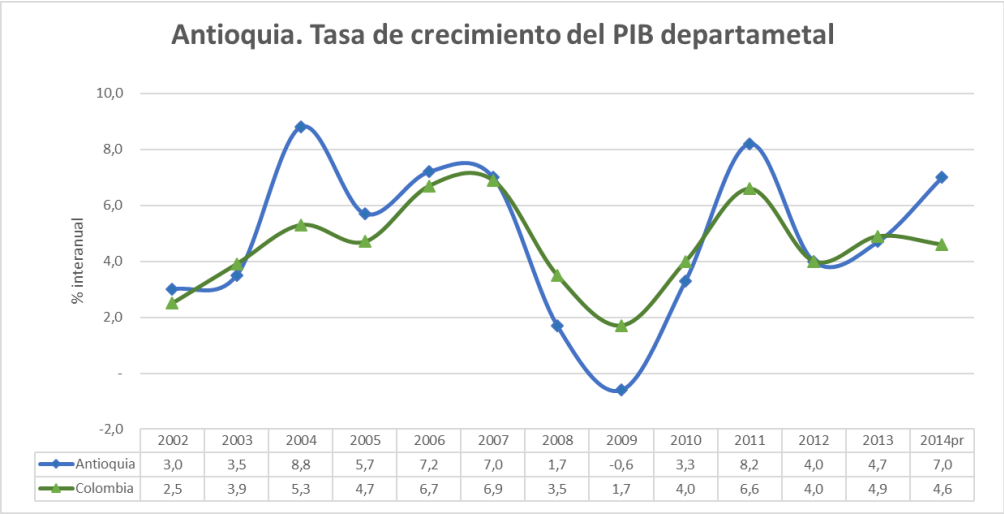
Para calcular el valor económico al momento de la defunción se escogió, para cada rango de edad, una persona promedio que fallezca prematuramente, aplicando los siguientes criterios:

- A una persona promedio de cada rango se le asignó un PIB per cápita anual no aportado, durante cada uno de los años que perdería si fallece prematuramente.
- Se calcula el valor presente del costo económico por persona fallecida prematuramente, para cada rango de edad, considerando el flujo anual de PIB que hubiera generado hasta completar su ciclo de vida, si no hubiese fallecido prematuramente. Este flujo se trae a valor presente del año en que fallece, aplicando una tasa social de descuento del 5% anual.
- Para cada año entre 2015 y 2030, se multiplica el número de muertes prematuras estimadas en cada año en el escenario BAU (para cada rango de edad), por el valor presente del costo económico generado por haberse truncado esas vidas en ese momento.
- El valor total de las pérdidas, para todos los rangos de edad, se contrasta con el PIB total del AMVA proyectado para cada año. Se obtiene así un indicador del costo anual de la contaminación por $PM_{2.5}$, en el escenario BAU del PIGECA, expresado como el porcentaje del PIB que se perdería si no se aplican oportunamente medidas para mejorar la calidad del aire.

3.1.3 Principales supuestos y parámetros.

Para las proyecciones económicas del período 2015 - 2030, se tomaron como referencia cifras del período 2002 – 2014 reportadas por la Gobernación de Antioquia en su *Marco Fiscal de Mediano Plazo 2017 – 2026,* las cuales se presentan en la siguiente figura.

Figura 3.1 - Antioquia. Comportamiento del PIB departamental.



	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014pr
Antioquia	3,0	3,5	8,8	5,7	7,2	7,0	1,7	-0,6	3,3	8,2	4,0	4,7	7,0
Colombia	2,5	3,9	5,3	4,7	6,7	6,9	3,5	1,7	4,0	6,6	4,0	4,9	4,6

Fuente: (Gobernación de Antioquia, 2016) a partir de DANE (2015)

Tomando como referencia esta tendencia, y asumiendo que el período proyectado tendrá un comportamiento similar al de estos 13 años pasados, para aplicar la metodología descrita de valoración del costo de la contaminación, se asumieron los siguientes supuestos y parámetros:

- El PIB per cápita reportado para el departamento de Antioquía en 2014 fue de 15,9 millones de pesos corrientes (DANE, 2016).
- El crecimiento de la economía del departamento de Antioquia en 2015 fue de 3,1% (Gobernación de Antioquia, 2016). De esta forma, el PIB per cápita para 2015, a pesos de 2017, se estima en 19,2 millones de pesos.
- Entre 2002 y 2014, la tasa promedio anual de crecimiento de la economía de Antioquia fue de 4,9% (Gobernación de Antioquia, 2016). Se asume esta tasa de crecimiento para proyectar el PIB per cápita a futuro, ajustándolo por la tasa de crecimiento de la población.
- Para el cálculo de años perdidos por muertes prematuras según los rangos de edad de la persona al morir, se emplea la expectativa de vida de 77,8 años reportada para Colombia (OECD, 2017).

3.2 COSTOS DE LA CONTAMINACIÓN SEGÚN VALOR AGREGADO PERDIDO - ESCENARIO BAU 2015-2030

Aplicando la metodología propuesta y usando los supuestos y parámetros descritos, se obtuvieron los principales resultados planteados en los objetivos de la presente etapa de la asistencia técnica. En esta sección se presenta un resumen de dichos resultados, enfocándose en los que se obtienen empleado los valores más probables de las relaciones dosis-respuesta, dentro del intervalo de confianza del 95% que arroja el modelo de estimación Cox de supervivencia empleado.

La síntesis que se presenta en esta sección muestra los resultados límite que se obtuvieron usando las estimaciones más probables de la relación dosis-respuesta aplicadas al escenario BAU de $PM_{2.5}$ entre 2015 y 2030, pero variando los supuestos sobre la forma funcional de esta relación. Estos resultados se ilustran mostrando los dos extremos obtenidos, según la forma de aproximarse a la estimación final:[13]

- Una aproximación *muy moderada*. Asumiendo que existe umbral de 10 $\mu g/m^3$ de $PM_{2.5}$ por debajo del cual, como lo estima la OMS, no se presentan afectaciones significativas sobre la salud; y suponiendo que la relación dosis-respuesta es decreciente, a partir de 40 $\mu g/m^3$ de concentración promedio anual de $PM_{2.5}$.
- Una aproximación *más severa*. Excluyendo la existencia de un umbral por debajo del cual no se presentan afectaciones; y suponiendo un comportamiento lineal de la relación dosis-respuesta del $PM_{2.5}$ sobre las causas de muerte de las personas, a cualquier nivel de contaminación.

[13] Los distintos puntos intermedios entre estas dos aproximaciones límite, así como la los resultados de valoración correspondientes a las relaciones dosis-respuesta mínima y máxima dentro del intervalo de confianza del 95% resultantes, se presentan en el *Anexo IV. Valor económico del costo de la contaminación del aire en el AMVA.*

Cuadro 3.1 - AMVA. Costo de la contaminación del aire - Escenario BAU (Aproximación moderada)

Límite máximo (umbral) de no afectación: $PM_{2.5}$ > = 10 µg/m3 (OMS) No linealidad de dosis-respuesta a partir de $PM_{2.5}$ >= 40 µg/m^3			
	2015	2030	Total 2015-2030
Total muertes prematuras	*2.543*	*6.220*	*70.921*
- De 0 a 19 años	25	53	657
- De 20 a 64 años	449	1.088	12.741
- De 65 años o más	2.069	5.079	57.523
Pérdidas (billones COP de 2017)	0,29	0,67	
VP Pérdidas (billones COP de 2017)			5,08
Pérdidas (miles de millones USD de 2017)	0,10	0,22	
VP Pérdidas (miles de millones USD de 2017)			1,7
Costo de muertes prematuras (% del PIB)	0,4%	0,4%	0,4%
		Tasa de descuento =	5,0%

Fuente: Cálculos Econometría (2017)

Cuadro 3.2 - AMVA. Costo de la contaminación del aire - Escenario BAU (Aproximación severa)

Sin umbral de $PM_{2.5}$ de no afectación Linealidad de dosis-respuesta en todos los niveles de $PM_{2.5}$			
	2015	2030	Total 2015-2030
Total muertes prematuras	*3.710*	*11.594*	*114.375*
- De 0 a 19 años	36	97	1.044
- De 20 a 64 años	655	2.024	20.485
- De 65 años o más	3.019	9.473	92.846
Pérdidas (billones COP de 2017)	0,43	1,25	
VP Pérdidas (billones COP de 2017)			8,02
Pérdidas (miles de millones USD de 2017)	0,14	0,42	
VP Pérdidas (miles de millones USD de 2017)			2,7
Costo de muertes prematuras (% del PIB)	0,6%	0,8%	0,7%
		Tasa de descuento =	5,0%

Fuente: Cálculos Econometría (2017)

3.3 Estimación del costo por muertes prematuras. Método del valor estadístico de la vida

Según un documento que extrae las implicaciones para la toma de decisiones de política que se derivan del meta análisis que ha venido realizado la OECD durante varios años sobre las estimaciones del valor estadístico de la vida, es altamente relevante utilizar este método de valoración dentro de los análisis beneficio/costo de las medidas orientadas a reducir el

riesgo de morir prematuramente (OECD, 2011). El valor estadístico de la vida (VSL, por su sigla en inglés) es una medida resumida de la disponibilidad que tienen las personas a pagar por reducir el riesgo de morir prematuramente. Es decir, el monto que estarían dispuestas las personas a sacrificar de su ingreso, el cual podrían usar para adquirir otros bienes que generan bienestar, para disminuir el riesgo de morir prematuramente. En otras palabras, lo que están dispuestas las personas a sacrificar para disfrutar la vida más por tiempo (OECD, 2010).

Por otra parte, ante la ausencia de estimaciones del VSL para un determinado país, se reconoce que es viable usar estimaciones de otros países, tomando la precaución de ajustarlas hacia arriba o hacia abajo, de acuerdo con la relación del nivel de ingreso entre los países (OECD, 2010).

Siguiendo estas recomendaciones, y dado que en Colombia no se conocen estudios que hayan estimado el VSL de manera sistemática, se decidió recurrir a un estudio sobre la disponibilidad a pagar expresada por la población de São Paulo (Brasil) para reducir el riesgo de mortalidad asociado a la contaminación del aire (Ortiz, Markandya, & Hunt, 2009). Este estudio parte de reconocer que la reducción del riesgo de muerte es sin duda el beneficio más importante de las políticas de mejoramiento de la calidad del aire. De allí la importancia de poder expresar este beneficio en términos monetarios para realizar análisis de beneficio/costo.

El objetivo del mencionado estudio fue estimar la disposición a pagar de la población de São Paulo para reducir los riesgos de muerte asociados a la contaminación del aire. Esto significa estimar el valor de una vida estadísticamente considerada, es decir el valor estadístico de la vida (VSL), y o el valor específico de una vida en articular. Para tal fin, dicho estudio utiliza una metodología que había sido previamente probada por los autores en varios países industrializados (EE. UU., Japón, Canadá, Corea del Sur, Inglaterra, Francia e Italia): la valoración contingente. Este método de valoración recurre a una encuesta que simula una situación hipotética para indagar esta disponibilidad a pagar de un individuo por reducir un determinado riesgo. Para este caso particular, el estudio formuló esta situación hipotética (Ortiz, Markandya, & Hunt, 2009):

> *Supongamos que el Ministerio de Salud ha aprobado un nuevo producto que, si se utiliza durante los próximos diez años, reduciría su posibilidad de morir a causa de una enfermedad. Este producto reduciría su posibilidad total de morir en los próximos diez años, desde X hasta Y. Si usted decidiera tomar este producto, lo tendría que pagar de su propio bolsillo, cada año y durante los próximos diez años. Para que el producto tenga su pleno efecto, deberá usarlo todos los años durante los diez años. Asuma que la seguridad y efectividad del producto han sido demostradas en las pruebas requeridas por el Gobierno.*

Teniendo en cuenta que tendría menos dinero para gastar en otras cosas, ¿estaría dispuesto a pagar R $ x por año, durante los próximos diez años, (un total de R $ 10 ×) para comprar este producto? "

Con esta información y descartando todas aquellas respuestas que presentaban evidencias de no reflejar una preferencia consistente del encuestado, finalmente los autores concluyen que el valor sugerido de un año de vida de una persona promedio de São Paulo varía entre US $ 61.392 y 159.456 dólares. Para aplicar esta información a los resultados sobre riesgos de muertes prematuras por exposición a $PM_{2.5}$ en el AMVA, y retomando los resultados presentados en el Cuadro 2.10 del presente trabajo, se procedió de la siguiente forma (ver Cuadro 3.3):

a) Partiendo del número de muertes prematuras por exposición a $PM_{2.5}$ proyectadas para el período 2015 a 2030, por rango de edades, y asumiendo la expectativa de vida de 77,8 años reportada para Colombia la (OECD, 2017), se calcula el número de años que perdería una persona media de cada rango de edades, al morir prematuramente.

b) Con este parámetro de años perdidos por una persona media de cada rango de edades, por edades, se calcula el número total de años que se perderían por las muertes prematuras, para cada rango de edad: 445 mil en el escenario moderado y 738 mil en el escenario más severo.

c) Se retoma el valor total de pérdidas calculadas con el método de disminución del PIB resultante de las muertes prematuras: 1.693 millones de dólares en el escenario moderado y 2.674 millones de dólares en el escenario más severo (ver Cuadro 3.1 y 3.2).

d) Con esta información, se calcula el valor promedio del PIB que se pierde por cada año perdido por las muertes prematuras: 3.801 dólares por cada año pedido, en el escenario moderado; y 3.622 dólares por cada año perdido, en el escenario más severo.

e) Del VSL sugerido por los autores del estudio en Sao Paulo, se toma el valor inferior del rango sugerido: 61.392 dólares por cada año perdido. Tomando la relación del PIB per cápita entre los dos países, se ajusta este VSL al nivel de ingreso caso colombiano, arrojando un resultado de 45.032 dólares por año perdido.

f) Por último, este VSL para Colombia se compara con el valor estimado por la pérdida del PIB. Los resultados obtenidos muestran que, tanto en el escenario moderado como en el más severo, esta relación es de 1:12.

Cuadro 3.3 - Estimación de la relación entre Pérdida del PIB por muerte prematura y el Valor Estadístico de la Vida

Rango de edades	Escenario moderado			Escenario más severo		
	AMVA. Muertes prematuras estimadas por exposición a $PM_{2.5}$ (2015 - 2030)	Número de años perdidos por muertes prematuras		AMVA. Muertes prematuras estimadas por exposición a $PM_{2.5}$ (2015 - 2030)	Número de años perdidos por muertes prematuras	
		Por persona del rango de edad	Total años por muertes prematuras		Por persona del rango de edad	Total años por muertes prematuras
De 0 a 14 años	513	65.3	33,490	790	65.3	53,295
De 15 a 19 años	144	60.3	8,687	227	60.3	14,139
De 20 a 24 años	141	50.3	7,113	221	50.3	11,472
De 25 a 29 años	194	50.3	9,771	302	50.3	15,687
De 30 a 34 años	264	45.3	11,973	418	45.3	19,557
De 35 a 39 años	363	40.3	14,644	575	40.3	23,954
De 40 a 44 años	430	35.3	15,167	684	35.3	24,942
De 45 a 49 años	729	30.3	22,079	1,160	30.3	36,308
De 50 a 54 años	1,682	25.3	42,555	2,699	25.3	70,562
De 55 a 59 años	3,340	20.3	67,799	5,410	20.3	113,482
De 60 a 64 años	5,598	15.3	85,642	9,101	15.3	143,887
De 65 o más años	57,523	2.2	126,551	92,790	2.2	210,946
Total	70,921		445,469	114,375		738,231
Valor presente de PIB total perdido por muertes prematuras 2015-2030 (Millones USD de 2017)[1]			1,693			2,674
Costo promedio por disminución del PIB, por año perdido debido a muertes prematuras (USD de 2017)			3,801			3,622
Valor estadsitico de la vida (SVL) promedio por año, según Ortiz, Markandya & Hunt (2009)[2]			45,072			45,072
Valor estadístico de la vida (SVL) / Costo por disminución del PIB			11.9			12.4

[1] Usando tasa de descuento del 5%

[s] Se usó valor inferior del rango recomendado por los autores , ajustándolo por la diferencia de PIB per cápita entre Brasil y Colombia

Fuente Cálculos Econometría Consultores para este estudio

Esta relación entre el valor estadístico de la vida (ajustado a partir de un estudio en Sao Paulo) y el valor por pérdida de PIB (estimado para el caso específico del AMVA), se emplea ahora para estimar el costo total de la baja calidad del aire, en términos del VSL. Esto nos indica que, si la valoración de pérdida de calidad estaba entre 0,4 y 0,7 por ciento del PIB, usando ahora el método de VSL este valor se incrementa hasta un rango entre 5,1 y 8,5 por ciento del PIB de la región.

Capítulo 4

PRINCIPALES CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos de esta valoración económica del escenario *business-as- usual* de las proyecciones de contaminación del aire por material particulado en el Área Metropolitana del Valle de Aburra, muestran los elevados costos sobre la salud de las personas en que se incurriría si no se aplican de manera oportuna y efectiva las medidas contempladas en el Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire (PIGECA) que actualmente se encuentra en implementación. Estos costos de la contaminación se reflejarían en un impacto que pasaría, a pesos de hoy y bajo una aproximación moderada de medición de las afectaciones sobre la salud, de 290 mil millones de pesos anuales en 2015, a 670 mil millones anuales en 2030. Pero usando unos supuestos más severos para medir estas afectaciones, dichos costos pasarían de representar pérdidas de 430 mil millones de pesos en 2015 a 1,25 billones de pesos en 2030. Todo esto representaría un costo anual equivalente a un rango entre 0,4% y 0,7% del producto interno bruto regional.

A pesar de la significativa magnitud de estos costos expresados en unidades monetarias, lo más relevante de esta valoración son los indicadores que arroja sobre la vida de las personas. Las pérdidas de vidas humanas que se generarían si no se aplican las medidas adecuadas, son altamente significativas. Los siguientes resultados así lo demuestran:

- Entre 2008 y 2015, el 27% de las muertes de la población del AMVA se debió a enfermedades respiratorias y cardiopulmonares, todas ellas relacionadas directa o indirectamente con la calidad del aire.
- Para el año 2015, se estima que en el AMVA el material particulado causó entre 2.543 y 3.710 muertes prematuras, alrededor del 84% del total de defunciones causadas por enfermedades respiratorias y cardiopulmonares en la región en ese año.
- Si no se aplican medidas adecuadas y oportunas en el AMVA, se estima que en el año 2030 estarían muriendo prematuramente entre 6.220 y 11.594 personas en ese año a causa del crecimiento del material particulado.

En síntesis, los beneficios que se pueden obtener de las medidas que se están implementando para disminuir la actual tendencia de crecimiento de la contaminación del

aire el en AMVA tiene un alto margen positivo, especialmente en términos de prevención de muertes prematuras.

En términos de la implementación del PIGCA, se recomienda que estos resultados se utilicen en varias direcciones:

- Sirven como punto de referencia para ilustrar a aquellos sectores que se puedan ver afectados, en el corto plazo, por los costos que haya que asumir al aplicar las medidas que se adopten para mejorar la calidad del aire. Estos indicadores sirven para mostrarles que los beneficios de estas medidas se expresarán especialmente en la prevención de muertes prematuras de sus vecinos, de sus amigos y de sus familiares más directos.
- Sirven para convencer a los tomadores de decisiones, tanto a nivel local como nacional, que no son pocos los esfuerzos que se deben hacer, y los costos que hay que asumir, para contrarrestar las tendencias actuales de pérdida de calidad del aire en áreas urbanas como el AMVA. Estos resultados ilustran sobre la eventual viabilidad económica de tomar medidas oportunas y eficaces. Pero más importante aún, señalan la alta urgencia de tomar medidas adecuadas, ante la cantidad de vidas humanas que están en riesgo si eso no se hace.
- Sirven como punto de referencia para mostrar que los esfuerzos ya iniciados desde hace años para construir sistemas de información y usarlos en el análisis de los efectos de la calidad del aire sobre las personas, son de gran utilidad en términos del diseño y aplicación de políticas públicas sobre la calidad del aire y, en consecuencia, sobre la calidad de vida de la población.
- Finalmente, sirven como punto de referencia para el diseño de medidas específicas de control de la contaminación del aire, especialmente porque avanzan en la comprensión de los efectos sociales y económicos que ella genera. Especialmente, sirven para identificar en cada caso concreto y para cada medida particular, los efectos económicos y sociales que se generaría con cada reducción esperada de la contaminación. Insumo este imprescindible, cuando se requiere realizar análisis costo beneficio antes de comprometer recursos públicos en la implementación de las respectivas medidas.

En síntesis, los resultados aquí obtenidos constituyen un desarrollo de los estudios que, durante la formulación del PIGECA, ilustraron de manera adecuada las implicaciones sociales y económicas del deterioro de la calidad del aire en el AMVA si no se aplican las medidas propuestas por este Plan. El principal valor agregado de este estudio es que realiza estimaciones, y genera información detallada, sobre las relaciones entre el comportamiento

de la calidad del aire y las causas de defunción. Lo anterior, se logró tomando como referencia información detallada para cada uno de los municipios del AMVA, usando los registros diarios de la calidad del aire en cada una de las estaciones de monitoreo, disponibles entre 2008 y 2016. Así mismo, empleando para el análisis información desagregada, caso por caso, de cada una de las defunciones por todo tipo de causas, ocurridas entre 2008 y 2015 en el AMVA, e integrando en el análisis condiciones socioeconómicas y de ubicación del lugar de residencia de cada persona fallecida. Todo ello, repercute muy positivamente en el nivel de confiabilidad de los resultados obtenidos.

De todas formas, esto no significa que se deban culminar aquí los estudios epidemiológicos sobre los efectos de la calidad del aire en la salud de las personas. Es necesario continuar estos desarrollos, así como las valoraciones económicas que de ellos se puedan derivar. Por ejemplo, existen varias limitaciones identificadas a lo largo de este estudio, que pueden ser resueltas en estudios adicionales:

1) Hay grandes avances en la disponibilidad y acceso de información sobre las condiciones y características de las defunciones en el país, especialmente a nivel detallado de caso por caso. Sin embargo, para el análisis de las relaciones entre la calidad del aire y la mortalidad, es necesario seguir desarrollando sistemas de información que permitan incorporar al menos tres variables determinantes para el estudio de esas relaciones: i) los patrones de movilidad diaria, según el tipo de ocupación de cada persona, o de cada segmento de la población, para incorporar en el análisis variables que diferencien los niveles de exposición a la contaminación del aire; ii) los patrones de movilidad de largo plazo, para identificar la duración de la exposición, según el tiempo de residencia en cada municipio; y iii) los hábitos de las personas fallecidas, especialmente la forma en que cocinan los alimentos en el hogar (identificando los que usan combustión directa de leña o carbón) y si son fumadores activos o pasivos. Seguir avanzando en la incorporación de estas variables a los análisis, sería de gran utilidad para el diseño y priorización de cada una de las medidas que se diseñen y apliquen, así como para el seguimiento y evaluación de los resultados de las mismas.

2) La información actualmente disponible sobre defunciones en el país, así como el acceso inmediato y oportuno a los microdatos anonimizados del DANE sin ningún tipo de restricción, se constituye en un insumo de gran valor para adelantar los análisis realizados en este estudio. Sin embargo, la información pública sobre la morbilidad en el país, y en la región en particular, no ha alcanzado estos niveles de desarrollo. En primer lugar, porque acceder a las bases de datos existentes requiere acuerdos de confidencialidad que no se han podido obtener en los plazos establecidos para este estudio. En segundo lugar, porque información alterna y menos desagregada, como la

que contienen el Sistema Integral de Información de la Protección Social – SISPRO que recientemente está desarrollando el Ministerio de Salud, tiene dos limitaciones básicas: por una parte, para tener acceso a esta información se requiere adelantar tramites que, aunque ya se identificaron e iniciaron, no lograron culminarse dentro de los plazos establecidos para este informe; por otra parte, no fue posible tener acceso oportuno a información pública, que efectivamente tiene el SISPRO, debido a la escaza visibilidad y baja coordinación organizacional, lo que genera una dificultad para identificar su disponibilidad y localización usando métodos convencionales de búsqueda en su página web (www.sispro.gov.co)

3) Las limitaciones al acceso a información sobre la morbilidad de la población generaron una restricción básica para este estudio: el análisis quedó restringido a la evaluación de la mortalidad y la incidencia de la calidad del aire sobre la misma. En consecuencia, no fue posible hacer extensivo este análisis a las afectaciones de la calidad del aire sobre las enfermedades no mortales, afectado de todas formas la calidad de vida de las personas y con implicaciones económicas especialmente en costos de tratamiento médico y en días de trabajo perdidos por las ausencias e incapacidades generadas.

Las anteriores limitaciones dejan abierto el espacio para seguir incluyendo dentro de las prioridades del PIGECA, el análisis de las afectaciones de la calidad del aire sobre la salud de las personas y su respectiva valoración económica. Estos son asuntos dinámicos y de alta relevancia, que requieren el desarrollo de sistemas de seguimiento y evaluación permanente.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

AMVA - UPB. (2016). *Actualización del Inventario de Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá-Año 2015*. Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá - Universidad Pontificia Bolivariana.

AMVA. (2017). Plan Integral de Gestión de Calidad del Aire cap 6.

AMVA. (2017). Plan Integral de Gestión de Calidad del Aire. Capítulo 6. Objetivos, Metas y Ejes Estratégicos . Area Metropolitana del Valle de Aburrá.

AMVA. (2017). *Plan Integral deGestión de Calidad del Aire; cap 7; Borrador Final (Julio 4)*. Medellín, Colombia.

AMVA- UPB. (2017). *SEERIES_AMVA*. Medellín , Colombia.

Chen, L., Knutsen, S., Shavlik, O., Beeson, W., Petersen, F., Ghamsary, M., & Abbey, O. (2005). The Association between Fatal Coronary Heart Disease and Ambient Particulate Air Pollution: Are Females at Greater Risk? *Environ. Health Perspect*, 113, 1723-1729.

Cleves, A. M., Gould, W. W., & Gutierrez, R. G. (2004). *An introduction to survival analysis using Stata*. Stata Press Publication.

DANE. (2016). *Informe de Coyuntura Económica Regional 2015 – Departamento de Antioquia*. Medellín: Departamento Nacional de Estadística.

DANE. (2017). *Estadisticas Vitales*. Obtenido de DANE: http://formularios.dane.gov.co/Anda_4_1/index.php/catalog/375/get_microdata

DANE. (2017). *Proyecciones de población*. Obtenido de DANE: http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion

DANE. (s.f.). *Lista Colombia 105 para la tabulación de mortalidad*. Bogotá: DANE. Dirección de Censos y Demografía. Estadísticas Vitales.

Dockery, D., Pope III, C., Xu, X., Spengler, J., Ware, J., Fay, M., . . . Speizer, F. (1993). An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities. *N. Engl. f. Med.*, 329, 1753-1759.

Enstrom, J. (2005). Fine Particulate Air Pollution and Total Mortality Among Elderly Californians , 1973 - 2002. *lnhal. Toxicol*, 17, 803-816.

Gobernación de Antioquia. (2016). *Marco Fiscal de Mediano Plazo 2017 – 2026*. Medellín: Gobernación de Antioquia.

Goss, C., Newsom, S., Schildcrout, J., Sheppard, L., & Kaufman,]. (2004). Effect of Ambient Air Pollution on Pulmonary Exacerbations and Lung Function in Cystic Fibrosis. *Am. J. Repir. Crit. Care Med*, 169, 816-821.

Jerrett, M., Burnett, R., Ma, R., Pope, C. I., Krewski, D., Newbold, K., . . . Thun, M. (2005). Spatial Analysis of Air Pollution and Mortality in Los Angeles. *Epidemiol*, 16, 727-736.

Krewski, D., Burnett, R., Goldberg, M., Hoover, K., Siemiatycki, J., Jarret, M., . . . White, W. (2000). *Reanalysis of the Harvard Six Cities Study and the American Cancer Society Study of Particulate Air Pollution and Mortality. Special Report.* Cambridge MA: Health Effects Institute.

Krewski, D., Jerrett, M., Burnett, R. T., Ma, R., Hughes, E., Shi, Y., . . . Thun, M. J. (2009). *Extended Follow-Up and Spatial Analysis of the American Cancer Society Study Linking Particulate Air Pollution and Mortality.* Health Effects Institute (HEI).

Laden, F., Schwartz, J., Speizer, P., & Dockery, O. (2006). Reduction in Fine Particulate Air Pollution and Mortality: Extended Follow-Up of the Harvard Six Cities Study. *Am. J. Respir. Crit. Care Med*, 173, 667-672.

McDonnell, W., Nishino-Ishikawa, N., Petersen, F., Chen, L., & Abbey, O. (2000). Relationships of Mortality with the Fine and Coarse Fraction of Long-Term Ambient PM10 Concentrations in Nonsmokers. *J. Expo. Anal. Environ. Epidemiol*, 10, 427-436.

OECD. (2010). *Valuing lives saved from environmental, transport and health policies: a meta-analysis of stated preference studies* . Paris.

OECD. (2011). *Valuing Mortality Risk Reductions in Regulatory Analysis of Environmental, Health and Transport Policies: Policy Implications.* Paris.

OECD. (2017). *Health status.* OECD Health Statistics (database). Retrieved Octuber 5, 2017, from http://dx.doi.org.ezproxy.unal.edu.co/10.1787/data-00540-en

OMS. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005.* Organización Mundial de la Salud.

Ortiz, R. A., Markandya, A., & Hunt, A. (2009). Willingness to Pay for Mortality Risk Reduction Associated with Air Pollution in São Paulo. *Rev. Bras. Econ., 63*(1), 3-22.

Ostro, B. (1994). *Estimating the Health Effects of Air Pollution: A Method with an Application to Jakarta.* Washington D.C: Policy Research Working Paper No. 1301, World Bank.

Pope III, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 709-742.

Pope III, C. A., Thun, M. J., Burnett, R. T., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., & Thurston, G. D. (2002). Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-Term Exposure to Fine Particulate Air Pollution. *J. Am . Med. Assoc.*, 287, 1132-1141.

Pope III, C., Burnett, R., Thurston, G., Thun, M., Calle, E., Krewski, D., & Godleski, J. (2004). Cardiovascular Mortality and Long-Term Exposure to Particulate Air Pollution: Epidemiological Evidence of General Pathophysiological Pathways of Disease. *Circulation*, 109, 71-77.

Pope III, C., Thun, M., Namboodiri, M., Dockery, D., Evans, J., Speizer, F., & Heath, J. (1995). Particulate Air Pollution as a Predictor of Mortality in a Prospective Study of U.S. Adults. *Am. J. Respir. Crit. Care. Med*, 151, 669-674.

Sánchez, E., Ahmed, K., & Awe , Y. (2007). *Environmental Priorities and Poverty Reduction, A Country environmental Analysis for Colombia.* Washington, D.C: The World Bank.

Woodruff, T., Parker, J., & Schoendorf, K. (2006). Fine Particulate Matter (PM2.5) Air Pollution and Selected Causes of Postneonatal Infant Mortality in California. *Environ. Health Perspect*, 114, 786-790.

ANEXO I. DEFUNCIONES POR ENFERMEDADES ASOCIADAS A CALIDAD DEL AIRE EN EL AMVA.

Ver documento aparte

Anexo II. Estaciones de Monitoreo y Concentración de PM2.5 en Municipios del AMVA

Ver documento aparte

ANEXO III. ESTIMACIÓN DEL IMPACTO DE PM2.5 SOBRE LA MORTALIDAD EN EL AMVA

Ver documento aparte

ANEXO IV. VALOR ECONÓMICO DEL COSTO DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN EL AMVA.

Ver documento aparte